

HELSINGIN TEKNILLINEN KORKEAKOULU
KONEINSINÖÖRIOSASTO

Jukka Raunio

DIGITAALISEN SIGNAALIANALYSAATTORIN KÄYTTÖ
LENTOKONEEN MAAVÄRÄHTELYKOEISSA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 19.05.1980

Työn valvoja

Vt. apulaisprofessori
Olli Saarela

Työn ohjaaja

Diplomi-insinööri
Juha Kokko



TIIVISTELMÄ

Työssä on tutkittu digitaalisen signaalianalyssaattorin käyttömahdollisuuksia lentokoneen maavärähtelykokeissa. Siirtofunktio-
mittauksen teoriaa ja analyssaattorin toimintaperiaatetta selvittävän kirjallisuusosan lisäksi vertaillaan yleisemmin käytettyä analogiamenetelmää ja digitaalisen signaalianalyssaattorin käyttöön perustuvaa menetelmää keskenään. Sovellutuksena on suoritettu apumoottorilla varustetun purjelentokoneen PIK-20E maavärähtelykokeet. Analyssaattorin todettiin soveltuvan tehtävään hyvin ja mittaustuloksia voidaan pitää tyydyttävänä. Sovellutusmittausten puutteet johtuvat lähinnä oheislaitteiden heikkouksista ja siitä, että PIK-20E oli käytettävissä vain lyhyen aikaa. Koetulosten keruu ja analysointi magneettinauhatieostosta oli mittausten aikaavievin ja hankalin vaihe. Mittaustulosten jatkokäsittely tietokoneella ja värähtelevää lentokonetta kuvaavan mallin kehittäminen toisi parannuksen viimeksimainittuun puutteeseen.

SISÄLLYSLUETTELO

	sivu
ALKULAUSE	1
SYMBOLILUETTELO	2
1. JOHDANTO	4
2. VÄRÄHTELYN KOMLEKSIESITYS	6
2.1 Tasapainoyhtälö	6
2.2 Laplace-muunnos	8
2.3 Siirtofunktio	9
2.4 Komleksitaso	10
2.5 Fourier-muunnos	11
2.6 Värähtelymuodot	12
2.7 Vaimennuksen mittaus	14
3. SIGNAALIANALYSAATTORI	16
3.1 Mittauksen suoritus	17
3.2 AD-muunnin	18
3.3 Ikkuna ja painofunktio	21
3.4 Diskreetti Fourier-muunnos	23
3.5 Liipaisu eli "triggaus"	24
4. AIKA- JA TAAJUUSTASON FUNKTIOT	26
4.1 Aikatason funktiot	26
4.1.1 Keskiarvojen liipaisu	26
4.1.2 Autokorrelaatio	27
4.1.3 Ristikorrelaatio	28
4.1.4 Impulssivaste	28
4.1.5 Amplitudihistogrammi	29
4.2 Taajuustason funktiot (spektrianalyysi)	30
4.2.1 Lineaarinen spektri	30
4.2.2 Autospektri	31

4.2.3	Ristispektri	32
4.2.4	Siirtofunktio	33
4.2.5	Koherenssifunktio	33
5.	HERÄTETYYPIT	35
5.1	Satunnaisheräte	35
5.2	Pseudo-satunnaisheräte	36
5.3	Jaksollinen satunnaisheräte	37
5.4	Transienttivaiheen mittaus	37
6.	LENTOKONEEN MAAVÄRÄHTELYKOKEET	41
6.1	Yleistä	41
6.2	Tutkittavat värähtelymuodot	45
6.3	Klassinen menetelmä	51
6.4	Siirtofunktion mittaus	57
6.5	Yleistettyjen massojen määrittäminen	60
7.	PIK-20E:n MAAVÄRÄHTELYKOKEET	63
7.1	Koneen esittely	63
7.2	Mittausjärjestelyt	65
7.3	Mittauslaitteet	68
7.4	Mittau tulokset	72
7.5	Tulosten tarkastelua	93
8.	YHTEENVETO	96
	LÄHTEET	97
	KIRJALLISUUTTA	99
	LIITTEET	

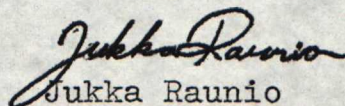
ALKULAUSE

Työn valmistuessa lausun parhaimmat kiitokseni sen valvojalle vt. apulaisprofessori Olli Saarelalle sekä ohjaajalle kevytrakennetekniikan laboratorioinsinööri Juha Kokolle, jolta olen saanut aiheen työhöni.

Kiitoksen olen velkaa lujuusopin laboratorioinsinööri Iikka Järvenpäälle, joka on opastanut minua mittaustekniikkaan liittyvissä käytännön asioissa.

Kevytrakennetekniikan ja lujuusopin laboratorioiden henkilökuntaa kiitän työn aikana saamastani avusta.

Helsingissä 05.05.1980


Jukka Raunio

SYMBOLILUETTELO

A	aerodynaamisten voimien matriisi	
a_k	residymatriisi (indeksi k)	
B(s)	systeemimatriisi	
C	ohjainlinjan jäykkyys	Nm
C_c	kriittillinen vaimennus	Ns/m
c	viskoosivaimennus	Ns/m
F_D	vaimennusvoima	N
F_{max}	kaistanleveys	Hz
f_n	ominaistaajuus	Hz
f(t)	voimafunktio	N
G	rakenteellinen vaimennusmatriisi	
G_{xx}	tehospektri	
G_{yx}	ristispektri	
g	dimensioton vaimennuskerroin	
H(f)	siirtofunktio	
h(t)	impulssivaste	
I	ohjainpinnan massahitausmomentti	kgm ²
j	imaginääriyksikkö	
K	jäykkyysmatriisi	
k	jousivakio	N/m
K_e	resonanssin tehollinen jäykkyys	N/m
M	yleistettyjen massojen matriisi	
M_e	resonanssin tehollinen massa	kg
m	massa	kg
p_k	siirtofunktion k:s napa	
Q	suurennuskerroin	
R_{xx}	autokorrelaatio	
R_{xy}	ristikorrelaatio	

s	kompleksiluku	s
T	otannan kesto aika	s
t	aika	m
u	siirtymä	m/s
v	nopeus	m
x	värähtelyn siirtymä	m
δ	siirtymä	
ξ	vaimennussuhde c/C_c	
Ω	resonanssikulmanopeus	rad/s
ω	kulmanopeus	rad/s
ζ	vaimennuskerroin	1/s

1. JOHDANTO

Lentokoneelle suoritettavissa maavärähtelykokeissa määritetään rakenteen eri ominaistaajuuudet, siirtymämuodot, rakenteellinen vaimennus sekä ns. yleistetyt massat. Koetulosten perusteella lasketaan tai osoitetaan empiirisesti, ettei koneen sallitulla nopeusalueella esiinny vaimentumatonta aeroelastista värähtelyä eli flutteria. Koetuloksia käytetään myös ohjainpintojen massatasapainotuksen mitoittamiseen.

Tämän työn tarkoitus oli tutkia Teknillisen Korkeakoulun Konelaboratorioon hankitun HP-5420A digitaalisen signaalianalysaattorin käyttömahdollisuuksia lentokoneen maavärähtelykokeissa sekä kehittää tarvittavat menetelmät mittausten suorittamiseksi.

Luvussa 2 tarkastellaan harmonisen värähtelyn tasapainoyhtälön esittämistä kompleksimuuttujan avulla, esitetään siirtofunktion käsite sekä keinoja rakenteellisen vaimennuksen määrittämiseksi. Luvun tarkoitus on antaa intuitiivinen matemaattinen tausta myöhemmin esiteltävän digitaalisen signaalianalysaattorin toimintaperiaatteen ymmärtämiseksi.

Luvussa 3 esitellään lyhyesti käytetty analysaattori ja sen oleelliset toiminnot. Luku 4 käsittelee analysaattorilla mitattavia aika- ja taajuustason funktioita ja luku 5 yleisimpiä rakenteen herättämiseen käytettyjä menetelmiä.

Luku 6 käsittelee lentokoneen maavärähtelykokeita yleisesti ja digitaalisen signaalianalysaattorin kannalta. Siinä luetellaan kiinnostavat värähtelymuodot, esitellään aiemmin kehitetty ns. klassinen menetelmä sekä digitaalisen signaalianalysaattorin käyttöön perustuva menetelmä, joka poikkeaa edellisestä oleellisesti. Luvun lopussa esitetään yleistettyjen massojen mittaamenetelmät.

Sovellutuksena on suoritettu apumootorilla varustetun purjelentokoneen PIK-20E maavärähtelykokeet. Mittausjärjestelyt, käytet-

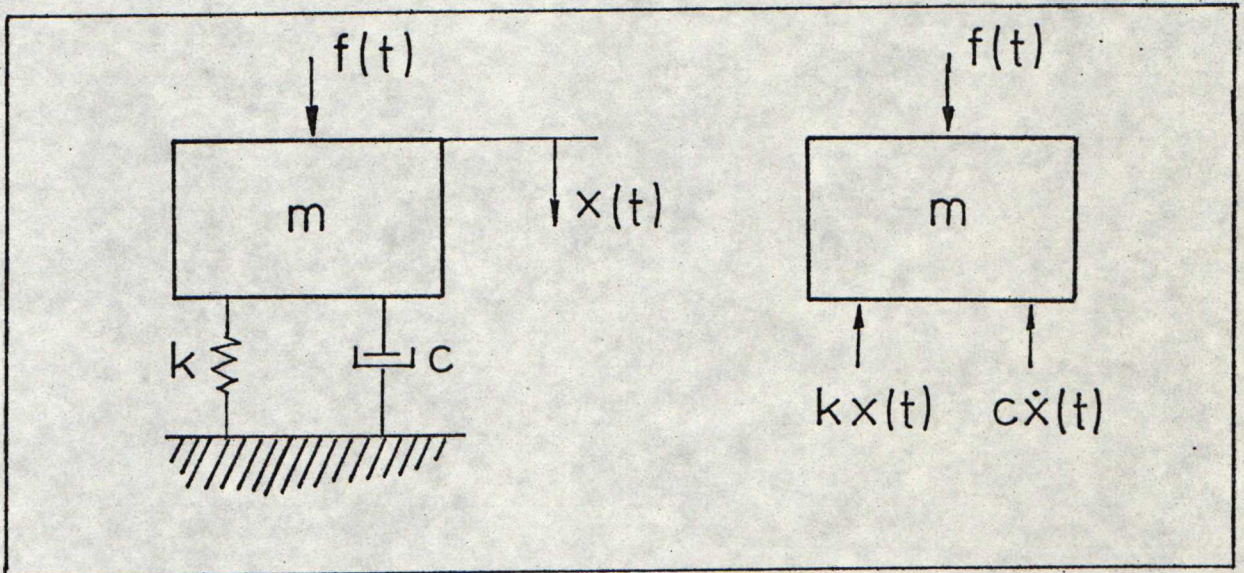
ty laitteisto ja mittaustulokset on esitetty luvussa 7. Luvussa 8 arvioidaan menetelmän hyvyttä ja annetaan parannusehdotuksia.

2. VÄRÄHTELYN KOMPLEKSIESITYS

Seuraavassa on esitetty värähtelyn kuvaaminen kompleksimuuttujan avulla ja siirtofunktion sekä kompleksitason käsitteet.

2.1. Tasapainoyhtälö

Kuvassa 2.1. on esitetty idealisoitu malli yhden vapausasteen vaimennetusta värähtelystä. Se koostuu jousesta, vaimentimesta ja massasta, jolla on vain yksi vapausaste (x - akseli).



Kuva 2.1. Yhden vapausasteen värähtely

Massaan kohdistuu ulkoinen, ajan mukana mielivaltaisesti vaihteleva voima $f(t)$. Mikäli systeemi käyttäytyy lineaarisesti, sen liikettä kuvaa lineaarinen toisen asteen differentiaaliyhtälö :

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t) \quad (2.1)$$

jossa \ddot{x} on kiihtyvyys, \dot{x} on nopeus, x on siirtymä, $f(t)$ on ulkoinen voima ja m , c sekä k ovat massa, viskoosi vaimennuskerroin ja jousivakio.

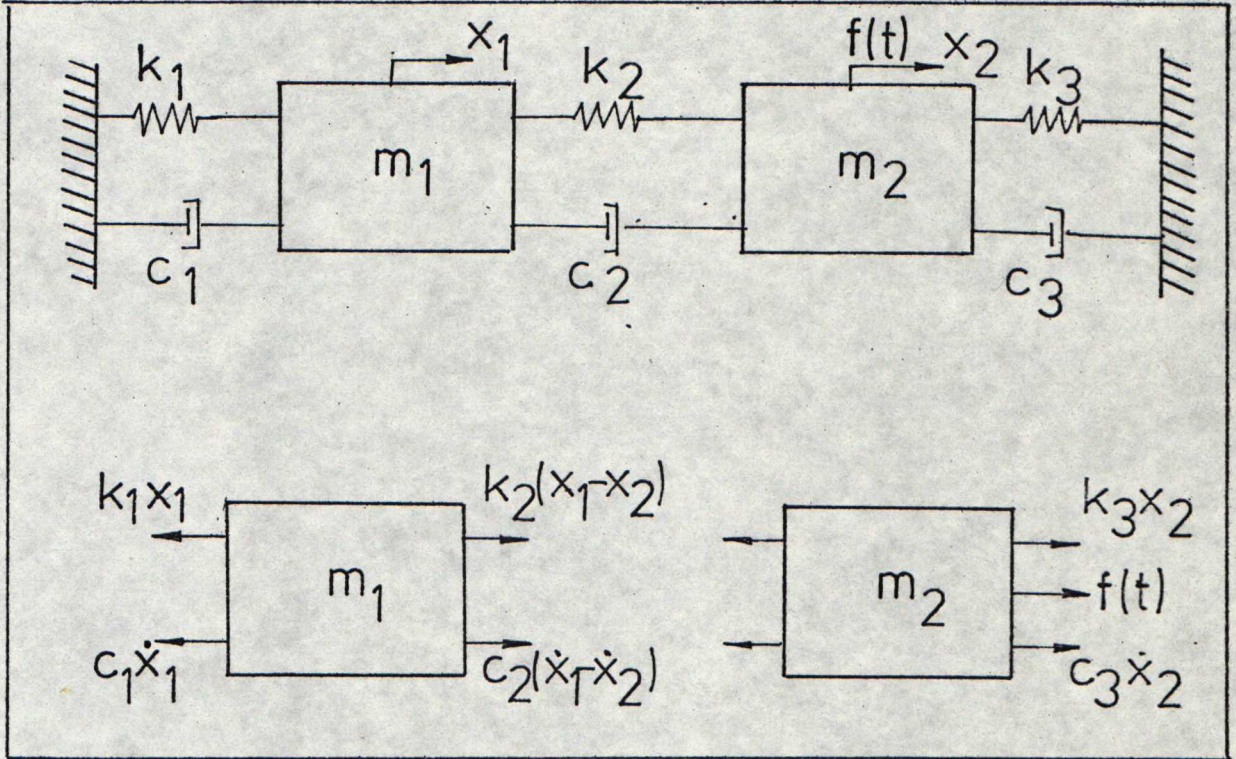
Kahden vapausasteen tapaus saadaan (samoin kuin em. yhden

vapausasteen tapauskin) muodostamalla systeemin tasapainoyhtälöt (kuva 2.2):

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_2 = 0 \quad (2.2)$$

ja

$$m_2 \ddot{x}_2 + (c_2 + c_3) \dot{x}_2 + (k_2 + k_3)x_2 - c_2 \dot{x}_1 - k_2 x_1 = f(t)$$



Kuva 2.2 Kahden vapausasteen värähtely

Matriisimuodossa em. yhtälöt ovat:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (c_1 + c_2) & (-c_2) \\ (-c_2) & (c_2 + c_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & (-k_2) \\ (-k_2) & (k_2 + k_3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ f(t) \end{bmatrix}$$

Yleiselle n -vapausasteen värähtelylle voidaan kirjoittaa:

$$[M] [\ddot{X}] + [C] [\dot{X}] + [K] [X] = [F] \quad (2.3)$$

jossa $[M]$ on $(n \times n)$ massamatriisi, $[C]$ on $(n \times n)$ vaimenusmatriisi, $[K]$ on $(n \times n)$ jäykkyyssmatriisi ja $[F]$ on voimavektori.

Värähtelyanalyysissä tarvittava informaatio saadaan esiin aikatason yhtälöstä 2.3. Monissa tapauksissa värähtelyn tarkastelu taajuustasossa osoittautuu kuitenkin hedelmällisemmäksi. Esimerkiksi ominaistaajuudet voidaan esittää havainnollisesti vain taajuustasossa. Tarkastelutason valinta riippuu halutusta informaatiosta, kolmas mahdollisuus on suorittaa tarkastelut kompleksisessä s -tasossa.

Tiedon siirto aikatasosta kompleksi- ja taajuustasoihin suoritetaan Laplace- ja Fourier-muunnoksilla. Aikatasoon voidaan palata käänteisten muunnosten avulla. Tasosta toiseen siirryttäessä värähtelyä koskeva informaatio säilyy muuttumattomana.

2.2 Laplace-muunnos

Ajasta riippuva funktio $f(t)$ muunnetaan kompleksimuuttujan s funktioksi $F(s)$ integraalilla:

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (2.4)$$

Yhden vapausasteen värähtely-yhtälö 2.1 on Laplace-muunnettuna /1, s.3/:

$$m(s^2 X(s) - sx(0) - \dot{x}(0)) + c(sX(s) - \dot{x}(0)) + kX(s) = F(s) \quad (2.5)$$

jossa $x(0)$ on massan m alkusiirtymä ja $\dot{x}(0)$ alkunopeus. Yhtälö 2.5 voidaan saattaa lyhyempään muotoon, kun alkuehdot sisällytetään uuteen voimafunktioon $F(s)$:

$$(ms^2 + cs + k)X(s) = F(s) \quad (2.6)$$

Yhtälö 2.1 on täten muunnettu differentiaaliyhtälöstä kompleksimuuttujan s algebralliseksi yhtälöksi. Muunnoksen syy on se, että kompleksitasossa matematiikka on helpompaa ja vaimennettua värähtelyä voidaan kuvata havainnollisemmin.

Kun $X(s)$ ratkaistaan yhtälöstä (2.6) saadaan:

$$X(s) = \frac{F(s)}{ms^2 + cs + k}$$

Nimittäjänä olevaa polynomia kutsutaan karakteristiseksi yhtälöksi, sillä sen juuret määräävät aikavasteen luonteen. Karakteristisen yhtälön juuria kutsutaan myös systeemin navoiksi tai singulariteeteiksi. Osoittajan juuria kutsutaan nolliksi. Navoissa funktio $X(s)$ menee äärettömyyteen ja nolli lissa sen arvo on nolla.

2.3 Siirtofunktio

Systeemin siirtofunktio on sen ulostulon Laplace-muunnoksen suhde sisäänmenon Laplace-muunnokseen - se on siis kompleksimuuttujan s funktio. Jos systeemillä on m sisäänmenoa ja n ulostuloa, siirtofunktioiden määrä on $m \times n$. Rakenteiden mekaniikassa käytetään seuraavia siirtofunktioita:

1. siirtymä/voima (komplianssi)
2. voima/siirtymä (näennäinen jäykkyys)
3. nopeus/voima (mobiliteetti)
4. voima/nopeus (impedanssi)
5. kiihtyvyys/voima (inertanssi)
6. voima/kiihtyvyys (näennäinen massa)

Ylläolevista 1, 3 ja 5 ovat liikevasteen ja voiman suhteita. Ominaistaajuudet havaitaan niiden kuvaajissa " piikkeinä " eli maksimiarvoina resonanssikohdissa. Puolestaan 2, 4 ja 6 ovat edellisten käänteisfunktioita ja ominaistaajuudet näkyvät minimiarvoina eli "laaksoina".

Kukin näistä kuudesta siirtofunktiosta on muunnettavissa toiseksi yksinkertaisilla algebrallisilla muunnoskaavoilla. Probleeman luonne, käytettävissä oleva mittausvälineistö ja totutut tavat määräävät mitä siirtofunktiota mitataan.

Siirtymä/voima on lausekkeena :

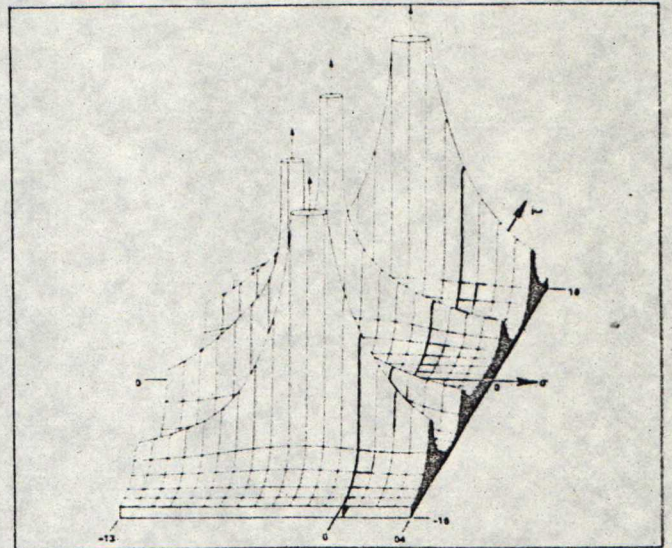
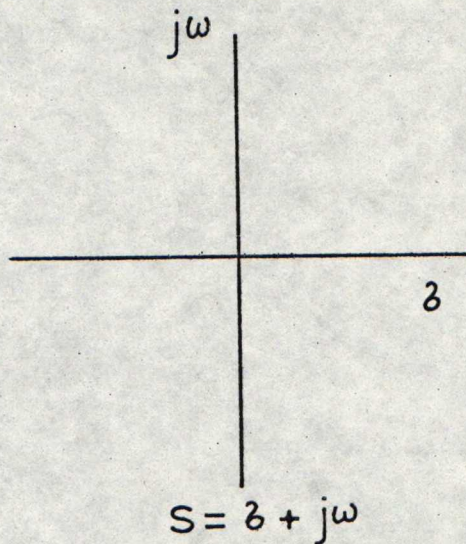
$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)}$$

Ottamalla huomioon yhtälö 2.6 saadaan:

$$H(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k} \quad (2.7)$$

2.4. Kompleksitaso

Määritelmän mukaan /1, s.4/ $s = \zeta + j\omega$; jossa ζ on vaimennuskerroin, ω on kulmanopeus ja $j = \sqrt{-1}$. Mikä tahansa s :n funktio, kuten esimerkiksi $H(s)$, voidaan esittää kompleksitason yläpuolisena pintana (kuva 2.3).



Kuva 2.3 Laplace-muunnos kahden vapausasteen systeemille, jonka navat ovat pisteissä $s = -3 \pm j11$ ja $-6 \pm j6$.

Systeemin Fourier-muunnos näkyy, kun tarkastellaan siirtofunktion kolmidimensionaalista esitystä taajuusakselin $s=j\omega$ suhteen. Se on merkitty kuvaan paksummalla viivalla.

2.5 Fourier-muunnos

Fourier-muunnos saadaan kaavasta 2.7 sijoituksella $s=j\omega$:

$$H(j\omega) = \frac{1}{-m\omega^2 + jc\omega + k} \quad (2.8)$$

Seuraavilla sijoituksilla saadaan yhtälö 2.8 tavanomaisesta värähtelymekaniikasta tuttuun muotoon:

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m}, \quad \zeta = \frac{c}{C_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad \text{jossa } C_c \text{ on nk. kriittinen vai-}$$

mennuskerroin.

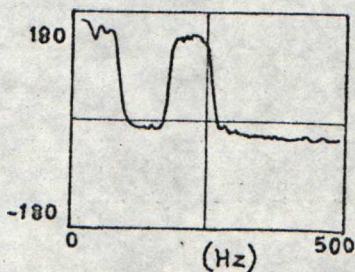
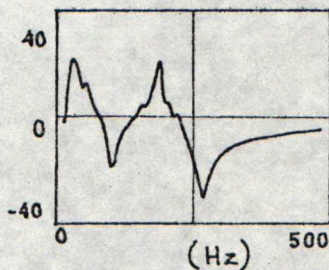
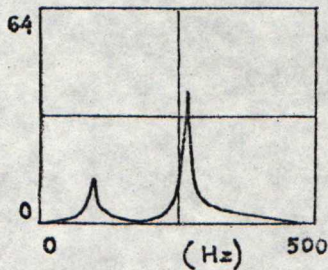
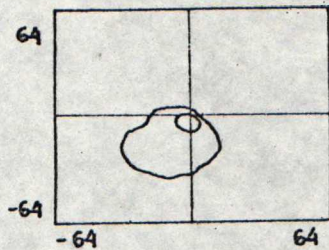
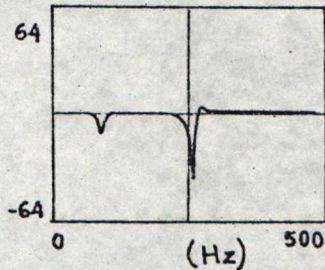
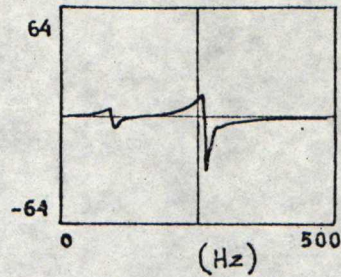
$$\frac{X(j\omega)}{F(j\omega)} = H(j\omega) = \frac{1}{k \left(1 + 2\zeta j\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} \right)} \quad (2.9)$$

Kun siirtofunktiota mitataan kokeellisesti käyttäen Fourier-muunnosta, saadaan taajuuden kompleksiarvoinen funktio. Systemin ominaisuuksien selvillesaamiseksi se on esitettävä reaali- ja imaginääriosana tai vaihtoehtoisesti suuruutena ja vaihekulmana. Nämä esitystavat näkyvät kuvassa 2.4.

Ylin kuva esittää kiihtyvyys/voima funktion reaaliosaa. Resonanssikohdassa reaaliosan arvo on nolla, ennen resonanssia sillä on paikallinen maksimi ja resonanssin jälkeen sillä on minimi.

Toisessa kuvassa on vastaava imaginääriosa, resonanssit näkyvät selvinä piikkeinä. Kunkin resonanssin amplitudi on suoraan verrannollinen imaginääripiikin korkeuteen ko. kohdassa.

Kolmannessa kuvassa on reaali/imaginääri koordinaatisto eli ns. Nyqvistin diagrammi. Jokaista ominaistajuutta vastaa yksi luuppi, lineaarisessa tapauksessa luupit ovat ympyröitä, jotka sivuavat origoa ja joiden keskipiste on imaginääriakselilla. Hystereesi aiheuttaa käytännön rakenteissa epälineaarisuutta.



Kuva 2.4

Kahden vapausasteen systeemin siirtofunktion eri esitysmuodot

Neljäs kuva esittää kiihtyvyyss/voima funktion suuruutta, joka on reaali- ja imaginääriosien neliöiden summan neliöjuuri.

Viides kuva on ns. Boden diagrammi. Se eroaa neljännestä kuvasta siinä, että suuruus on logaritminen. Logaritmiasteikko skaalaa tiedon siten, että sitä voidaan tarkastella yksityiskohtaisemmin sekä pienillä että suurilla input/output suhteilla. Lineaarilla asteikolla on taipumus korostaa piikkejä tarpeettomasti.

Alin kuva esittää vaihesiirtoa taajuuden funktiona.

2.6 Värähtelymuodot

Yleisen n -vapausasteen systeemin liikeyhtälöt voidaan kirjoittaa /1, s.4/

$$B(s)X(s) = F(s) \quad (2.10)$$

jossa $F(s)$ on ulkoisen voimavektorin Laplace-muunnos, $X(s)$ on liikevasteen Laplace-muunnos ja

$$B(s) = Ms^2 + Cs + K$$

$B(s)$ on nimeltään systeemimatriisi ja siirtomatriisi $H(s)$ on tämän käänteisfunktio:

$$H(s) = \frac{X(s)}{F(s)} \quad (2.11)$$

Siirtomatriisin elementit ovat siirtofunktioita. Yleisen muodon 2.11 sijasta $H(s)$ voidaan esittää myös osamurtojen summana:

$$H(s) = \sum_{k=1}^{2n} \frac{a_k}{s-p_k} \quad (2.12)$$

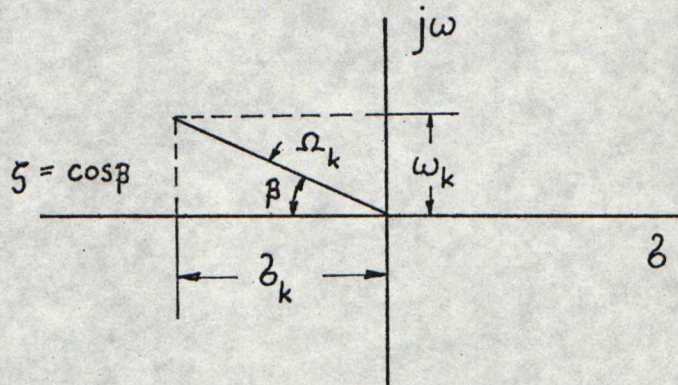
jossa n = vapausasteiden lukumäärä, p_k on k :s juuri yhtälössä, joka saadaan kun matriisin $B(s)$ determinantti asetetaan nolaksi. Termi a_k on juuren k residymatriisi ($n \times n$). Residy on määritelty liitteessä 1.

Edellä esitetyn perusteella juuret p_k ovat siirtofunktion napa-ja. Navat ovat kompleksilukuja ja esiintyvät pareittain liittolukuina, paitsi milloin systeemin vaimennus on kriittillinen tai ylikriittillinen. Jälkimmäisessä tapauksessa navat ovat reaali-lukuja ja sijaitsevat s -tasossa reaaliakselilla.

Kukin kompleksinen liittolukupari liittyy tiettyyn värähtelymuotoon k eli "moodiin":

$$p_k = -\zeta_k + j\omega_k \quad p'_k = -\zeta_k - j\omega_k \quad (2.13)$$

Heittomerkki viittaa liittolukuun, ζ_k on kyseisen moodin vaimennuskerroin ja ω_k on sen kulmanopeus. Nämä parametrit on esitetty s -tasossa kuvassa 2.5.



Kuva 2.5

Yhden vapausasteen systeemin s -tasoesitys

Kuvaan on merkitty myös resonanssikulmanopeus Ω_k ja vaimennustekijä ζ_k .

$$\Omega_k = \sqrt{\omega_k^2 + \zeta_k^2}, \quad \zeta_k = \frac{b_k}{\Omega_k}$$

Siirtomatriisi määrittää systeemin dynamiikan täydellisesti. Napojen lisäksi (jotka määrittävät ominaistaajuudet ja vaimennuksen) $H(s)$:n rivien ja sarakkeiden residyt määrittävät eri ominaistaajuuksiin liittyvät siirtymämuodot. Siirtymämuoto on elastisen rakenteen globaalinen ominaisuus; tästä seuraa, että tietty napa p_k on yhteinen kaikille systeemin siirtofunktiolle. Residyjen arvot riippuvat kuitenkin mitattavasta siirtofunktiosta.

2.7 Vaimennuksen mittaus

Useimmissa rakenteissa vaimennus on pieni, josta syystä sen mittaus on vaikeaa. Resonanssikohdan vaimennusta kuvataan suurennuskertoimella Q /4, s.8/:

$$Q = \frac{1}{2\zeta} \quad (2.14)$$

jossa ζ on vaimennussuhde c/C_c , c on viskoosivaimennuskerroin (voima/nopeus), C_c on kriittillinen vaimennuskerroin ja

$$C_c = 4\pi M_e f_n \quad (2.15)$$

jossa M_e on resonanssin tehollinen massa ja f_n on kyseinen ominaistaajuus. Mikäli hystereesivaimennusta on läsnä, vaimennus on tältä osin verrannollista siirtymään ja se on vastakkaisessa vaiheessa nopeuteen nähden. Tätä taajuudesta riippumatonta vaimennusta kuvataan dimensiottomalla kertoimella g :

$$Q = \frac{1}{g} \quad (2.16)$$

Kaavassa

$$g = \frac{jF_D}{K_e} \quad (2.17)$$

jossa F_D on taajuudella f_n vaikuttava vaimennusvoima ja K_e on resonanssin tehollinen jäykkyys. Suurennuskerroin Q voidaan mitata siirtofunktiosta useilla menetelmillä, kolme suosituinta ovat:

Tapa 1:

$$Q = \frac{X/F(f_n)}{X/F(0)} \quad (2.18)$$

jossa $X/F(f_n)$ on siirtymä/voima ominaistaajuudella f_n ja $X/F(0)$ on staattinen siirtymä/voima.

Tapa 2:

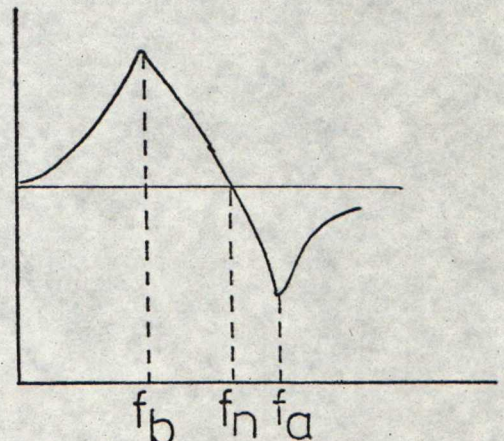
$$Q = f_n / \Delta f \quad (2.19)$$

jossa Δf on taajuuserotus pisteiden välillä, jotka ovat 3 dB nopeus/voiman alapuolella taajuudella f_n .

Tapa 3:

$$Q = \frac{(f_a/f_b)^2 + 1}{(f_a/f_b)^2 - 1} \quad (2.20)$$

jossa f_a on resonanssia suurempi taajuus, jolla kiihtyvyys/voiman reaali-osalla on piikki ja f_b on resonanssia pienempi taajuus, jolla reaali-osalla on vastakkainen piikki.

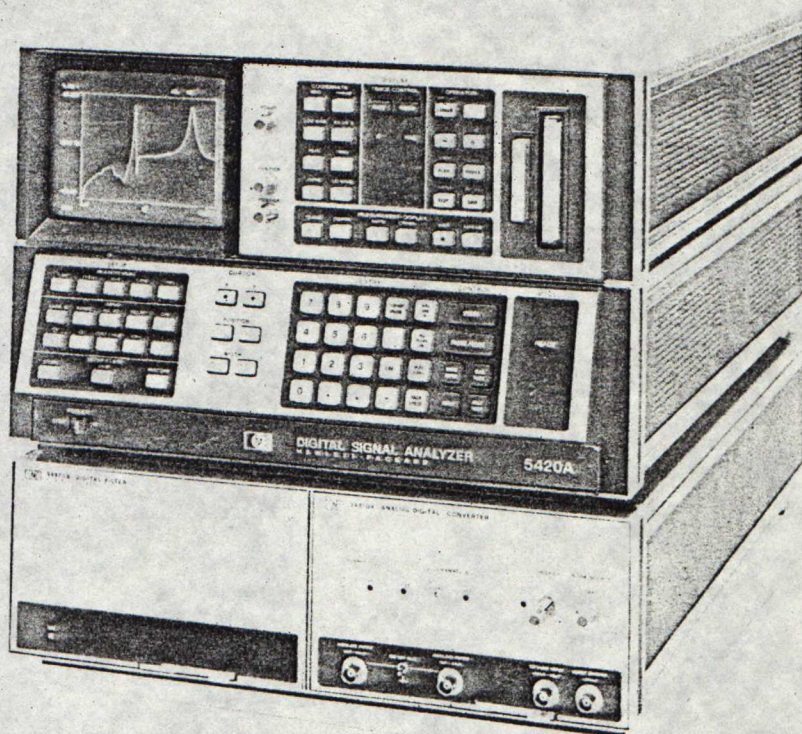


Kuva 2.6

Vaimennuksen määrittäminen, tapa 3

3. SIGNAALIANALYSAATTORI

Tässä työssä käytetty HP 5420A on kaksikanavainen digitaalinen instrumentti, jolla voidaan tutkia signaaleita aika- ja taajuustasoissa 25 kHz taajuudelle asti. Sovellutuksista mainittakoon värähtelyanalyysi, pyörivien koneiden analysointi, säätöjärjestelmien analysointi ja melututkimukset.



Kuva 3.1

HP-5420A digitaalinen signaalianalysaattori

Tutkittava signaali (tai signaalit) syötetään jommalle kummalle analysaattorin kanavista (tai molemmille). Analogiamuotoiset signaalit muunnetaan digitaalisiksi AD - muunninissa (Analog to Digital Converter), jonka jälkeen analysaattori suorittaa signaaleiden Fourier-muunnoksen. Kun mittaus on suoritettu, voidaan tuloksia tarkastella eri esitysmuodoissa pelkillä napin painalluksilla.

Laitteen näppäimistö on jaettu viiteen ryhmään:

DISPLAY -nappuloilla valitaan kuvaputken näyttö, esim. haluttu mittakaava ja funktio.

SETUP -nappuloilla määritellään mittaustila. Mittaustila voidaan antaa analysaattorin muistiin myös kasetilla.

CURSOR -nappuloilla saadaan kuvaputkelle vaaka- ja pystykurssi ja voidaan ohjata niitä.

ENTRY -nappuloilla annetaan analysaattorille numerotietoa ja ohjausparametreja.

CONTROL -nappuloilla ohjataan mittauksia.

Lisäksi analysaattorissa on liipaisun säädin TRIGGER ja melukanava, jolta saadaan satunnaismelua esim. tärhistimen vahvistimeen.

HP-IB järjestelmän avulla suoritetaan tiedonsiirto analysaattorin ja tietojenkäsittelyjärjestelmän tai piirturin välillä.

Seuraavassa käsitellään värähtelymittauksen suorittamista analysaattorin avulla sekä joitakin sen oleellisia toimintoja.

3.1 Mittauksen suoritus

Tiedot tutkittavasta rakenteesta saadaan kiinnittämällä siihen yksi tai useampia kiihtyvyysantureita. Kiihtyvyysantureista saadut signaalit vahvistetaan ja ohjataan joko suoraan analysaattoriin tai magneettinauhalle myöhemmin tehtävää analyysiä varten.

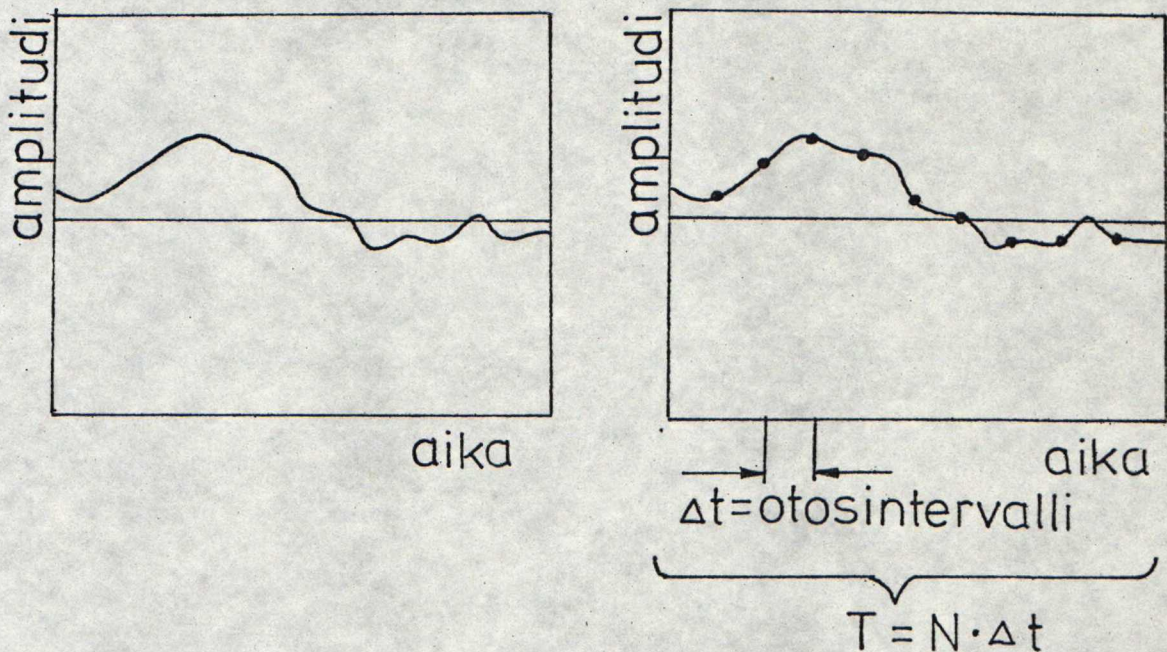
Silloin kun halutaan muodostaa siirtofunktio, pitää myöskin rakenteeseen johdettu herätevoima ohjata analysaattoriin.

Laitteeseen, jolla herätettä annetaan (tärustin, vasara tms.), kiinnitetään voima-anturi mittaamaan rakenteeseen kohdistettua voimaa. Voimasignaali syötetään toiselle analysaattorin kanavista.

Signaalianalysaattori on digitaali-instrumentti. Koska kiihtyvyyss- ja voimasignaalit tulevat analysaattoriin analogiamuodossa, ne on muunnettava digitaalisiksi ennen jatkokäsittelyä. Tämä tapahtuu ns. AD-muuntimessa.

3.2 AD-muunnin

Kuvan 3.2 mukaisesti AD-muunnin ottaa jatkuvasta analogiasignaalista tietyn pituisia otoksia. Kustakin otoksesta tulee digitaalisana, joka pannaan muistiin myöhempää käsittelyä varten.



Kuva 3.2

AD-toiminta aikatasossa /2, s.2-4/

Otosparametrit tai toiselta nimeltään aikatazon parametrit ovat /2/:

Δt - otosten välinen aika, "otosintervalli"

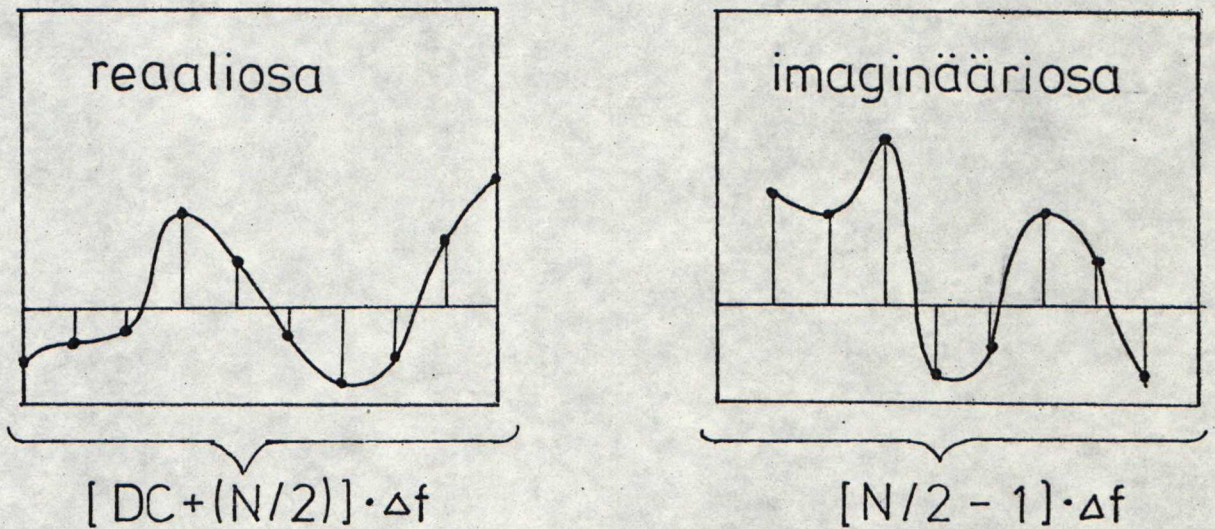
N - otosten lukumäärä (block size)

T - otannan kesto aika (total record length)

Kuvan 3.2 perusteella saadaan:

$$T = N \times \Delta t \quad (3.1)$$

Kun analysaattori on suorittanut tutkittavalle signaalille Fourier-muunnoksen, muodostuu taajuustasoon vastaava ryhmä parametreja /2, s.2-5/:



Kuva 3.3

AD-toiminta taajuustasossa

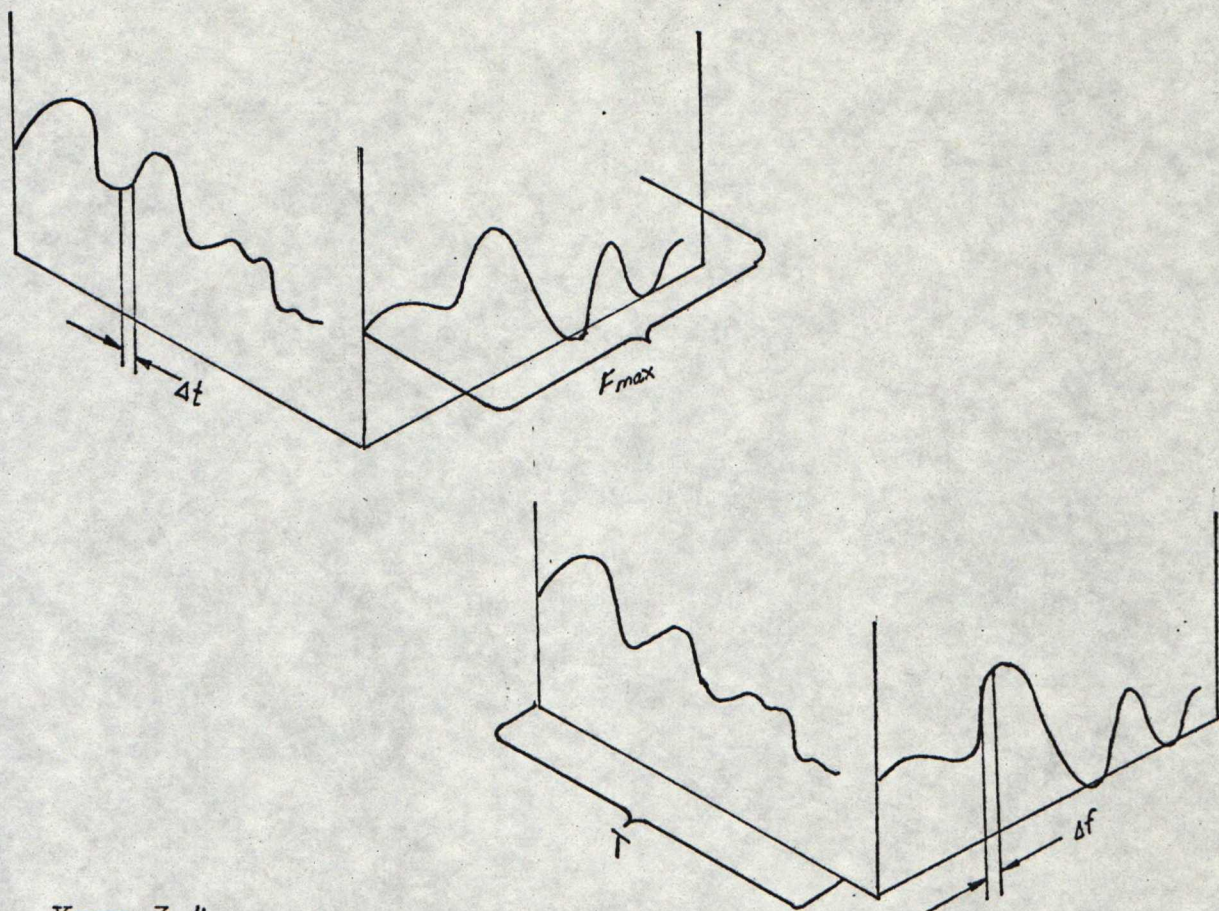
Δf - taajuuspisteiden välinen Hz-määrä eli "resoluutio"

$N/2$ - taajuuspisteiden lukumäärä. Kerroin puoli johtuu siitä, että taajuustason informaatio jakautuu kahteen osaan: suuruuteen ja vaiheeseen tai reaali- ja imaginääriosaan.

F_{\max} - suurin analysoitu taajuus eli kaistanleveys, kuvasta 3.3 nähdään:

$$F_{\max} = N/2 \times \Delta f \quad (3.2)$$

Aika- ja taajuustasoja voidaan tarkastella yhdessä kuvan 3.4 kaltaisesta esityksestä /2, s.2-6/.



Kuva 3.4

Aika- ja taajuustason välinen yhteys

Kuvan perusteella:

$$\Delta t = \frac{1}{2F_{max}} \quad (3.3)$$

$$\Delta f = \frac{1}{T} \quad (3.4)$$

On siis olemassa yhteys mittausajan ja resoluution välillä. Edellä esitetyt yhtälöt 3.1 - 3.4 on koottu seuraavan sivun taulukkoon 3-1. Mittauksessa käytettävät resoluution ja kaistanleveyden yhdistelmät riippuvat analysaattorin muistikapasiteetista. HP-5420A:n resoluutio määräytyy automaattisesti valitun kaistanleveyden perusteella sellaiseksi, että taajuuspisteiden lukumäärä kaistanleveydellä on aina 256. Joissakin analysaattorityypeissä voidaan vaihdella useampia parametreja.

Taulukko 3-1

Parametrien väliset yhteydet

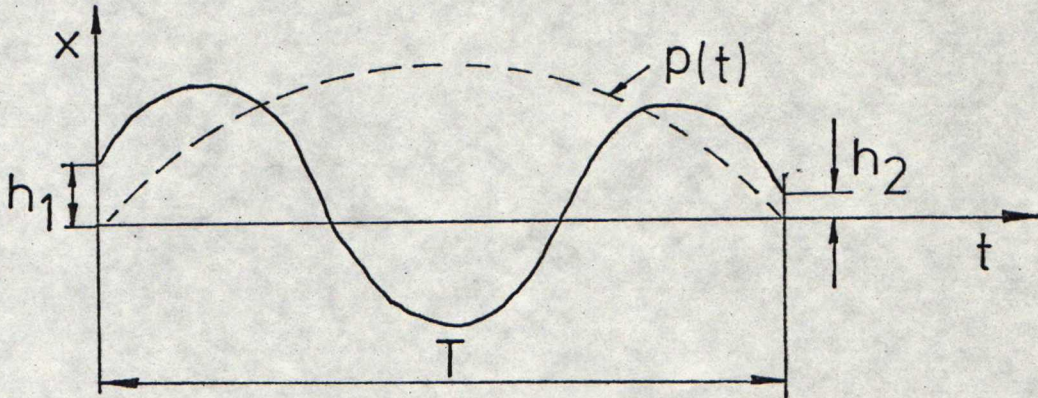
Valittu parametri	Valittu parametri määrää automaattisesti allaolevan parametrin arvon	Jäljelläolevat parametrit säätävät allaolevista kaavoista
1. Δt	$F_{\max} = \frac{1}{2 \Delta t}$	$T = N \Delta t$ $f = \frac{1}{N \Delta t}$
2. F_{\max}	$\Delta t = \frac{1}{2 F_{\max}}$	$T = N \Delta t$ $\Delta f = \frac{1}{N \Delta t}$
3. Δf	$T = \frac{1}{\Delta f}$	$\Delta t = \frac{T}{N}$ $F_{\max} = \frac{N}{2} \Delta f$
4. T	$\Delta f = \frac{1}{T}$	$\Delta t = \frac{T}{N}$ $F_{\max} = \frac{N}{2} \Delta f$

3.3 Ikkuna ja painofunktio

Mittauksen kestoaikaa T kutsutaan myös "ikkunaksi" (time window). Mittausikkunan alku- ja loppupisteiden epäjatkuvuuskohdat aiheuttavat tuloksiin virheitä, jotka saattavat

muodostua merkittäviksi tutkittaessa jatkuvia harmonisia funktioita.

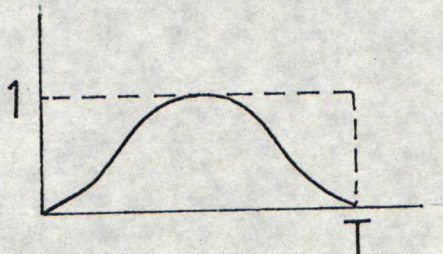
Kuvassa 3.5 on esitetty harmoninen signaali $x(t)$. Mittauksen alkuhetkellä $t = 0$ esiintyy signaalissa hyppäys h_1 ja mittausjakson lopussa $t = T$ hyppäys h_2 .



Kuva 3.5 /3, s.8/ Katkaisuvirhe ja painofunktio

Jotta hyppäyksien h_1 ja h_2 aiheuttama ns. katkaisuvirhe saataisiin mahdollisimman pieneksi, pitää signaali $x(t)$ saada ennen Fourier-muunnoksen laskemista alkamaan ja päättymään mahdollisimman juoheasti. Tähän tarkoitukseen analysoittorit käyttävät erilaisia painofunktioita $p(t)$. Painofunktion arvo mittausjakson alussa on nolla, se kasvaa maksimiinsa jakson puoliväliin tultaessa ja vähenee sitten symmetrisesti nolnaan.

Painofunktioita on useamman tyyppisiä ja niiden keskinäinen paremmuus riippuu tutkittavasta signaalista. Pitkäaikaisia jatkuvia signaaleita tutkittaessa on nk. Hanning -painofunktio osoittautunut hyväksi.

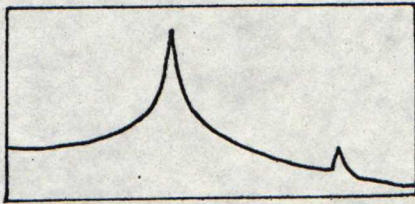


$$x = \left| \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2\pi t/T) \right|$$

Kuva 3.6

Hanning-painofunktio

Kun signaali $x(t)$ kerrotaan painofunktiolla $p(t)$, häviävät amplitudit uuden funktion $x'(t)$ pisteissä $t = 0$ ja T . Fourier-muunnos muodostetaan funktiosta $x'(t) = x(t)p(t)$. Painofunktion käyttö vääristää taajuusspektriä normaalisti siten, että muutoin terävinä esiintyvät huiput levenevät. Painofunktion käytön edullisuus näkyy huippujen välisen taustakohinan madaltumisena, kuva 3.7.



kosiniaallon spektri ilman painofunktiota



kosiniaallon spektri kerrottuna painofunktiolla $p(t)$, 3.5

Kuva 3.7 /3, s.9/

3.4 Diskreetti Fourier-muunnos

Analysaattori suorittaa ajan mukana muuttuvien analogiasignaaleiden Fourier-muunnoksen digitaalitietokoneensa avulla. Analyyttisessä muodossa Fourier-muunnos kirjoitetaan /2, s.4-3/:

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (3.5)$$

Digitaalisen Fourier-muunnoksen suorittamista varten jatkuva sisääntulosignaali katkotaan diskreeteiksi otoksiksi. Differentiaali dt korvautuu tällöin differenssillä Δt :

$$S_x(f) = \Delta t \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} x(n\Delta t) e^{-i2\pi fn\Delta t} \quad (3.6)$$

jossa $x(n\Delta t)$ on sisääntulon mitattu arvo. Katkotun otoksen avulla laskettu muunnos 3.6 ei enää sisällä tarkkaa suuruus-

ja vaiheinformaatiota $S_x(f)$:n kaikista taajuuksista. Diskretoidun muunnoksen tarkkuus päättyy johonkin kaistanleveyteen F_{\max} , joka puolestaan riippuu resoluutiosta Δf .

Diskretoidun Fourier-muunnoksen laskemiseksi tulisi otoksia ottaa ääretön määrä, mikä ei tietenkään ole mahdollista. Käytännössä mittausaika tulee rajoittaa johonkin äärelliseen arvoon T , mikä tarkoittaa sarjan 3.6 katkaisemista. Yhtälön 3.6 katkaistu muoto 3.7 ei enää aikaansaa jatkuvaa spektriä ja siitä käytetään nimitystä Diskreetti Fourier-muunnos DFT.

$$S_x(m\Delta f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) e^{-i2\pi m\Delta f n\Delta t} \quad (3.7)$$

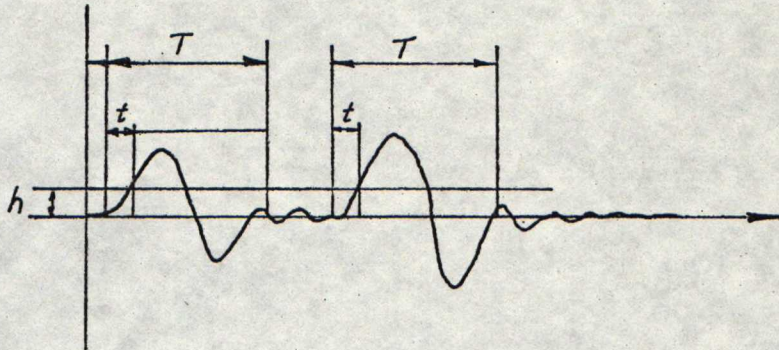
Tällainen diskreetti taajuusspektri on vain jaksollisilla funktioilla. Yhtälöä 3.7 käytettäessä oletetaan, että sisääntuleva funktio on jaksollinen jaksonpituudella T . Tämä oletta-
mus tehdään, vaikkei $x(t)$ tarkkaan ottaen olisikaan jaksollinen.

3.5 Liipaisu eli "triggaus"

Tutkittava värähtely on usein hyvin lyhytaikaista, kysymyksessä voivat olla esim. iskua seuraavat nopeasti vaimenevat värähtelyt. Otoksen oikea-aikainen taltioiminen on tällöin vaikeaa. Edellämäinnittua silmälläpitäen analysaattorit varustetaan automaattiliipaisulaitteistolla eli "triggerillä". Laite käynnistyy automaattisesti, kun värähtelyamplitudi saavuttaa tietyn ennalta asetettavissa olevan tason (trigger level) h , kuva 3.8.

Hetki, jolloin taso h saavutetaan, on nimeltään triggaushetki. Signaalin taltioiminen voidaan aloittaa ennalta määrättävissä olevan ajan t verran ennen triggaushetkeä tai sen jälkeen (pre-trigger delay ja post-trigger delay), ja taltiointi jat-

kuu tietyn ajan T , joka määräytyy valitun kaistanleveyden perusteella.



Kuva 3.8

Liipaisun periaate /3, s.2b/

Yleensä liipaisu tapahtuu, kun taso h ylitetään noususuunnassa, mutta koje voidaan asettaa suorittamaan liipaisu myös signaalin laskusuunnassa.

Liipaisulaitetta voidaan käyttää myös värähtelykäyrän keskiarvojen laskentaan. Näin voidaan menetellä silloin, kun värähtelyyn sisältyy melua tai muita epäjaksollisia komponentteja, jotka halutaan puhdistaa kuvaajasta. "Trigatuista" näytteistä muodostetaan ajallinen keskiarvo:

$$x(t) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_k(t) \quad (3.8)$$

jossa k on otoksen järjestysnumero ja aika t lasketaan kukin jakson alusta.

Liipaisu voidaan valita tapahtuvaksi neljällä tavalla. Internal-liipaisua käytetään silloin, kun liipaisu tapahtuu asetetulla tasolla nousu- tai laskusuunnassa. Free run -liipaisussa tietokone ottaa tietoa vastaan maksiminopeudellaan, External -liipaisussa liipaisun aiheuttaa ulkopuolinen signaali ja Line -liipaisussa liipaisu tapahtuu voimalinjan taajuudella.

4. AIKA- JA TAAJUUSTASON FUNKTIOT

Luvussa 2 on jo esitetty siirtofunktioittauksen matemaattinen tausta. Tutkittavasta kohteesta ja halutusta informaatiosta riippuen voidaan mitata useita muitakin aika- ja taajuustason funktioita.

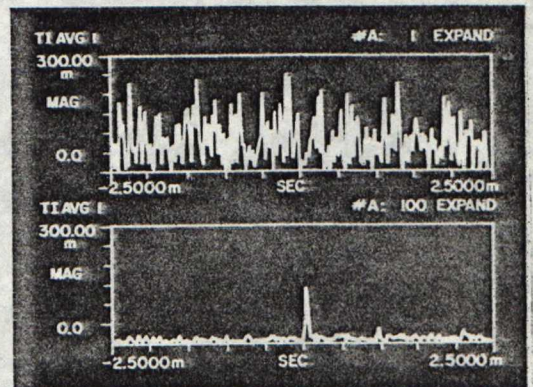
4.1. Aikatasen funktiot

4.1.1 Keskiarvojen liipaisu

Signaalia voidaan tarkastella aikatasossa suoraan, ilman muunnoksia. Puhtaasti jaksollisten signaalien tarkastelussa riittää yksi mitta. Normaalisti signaali sisältää kuitenkin melua tms. "kohinaa". Jaksolliset komponentit saadaan esiin kohdassa 3.5 esitellyllä keskiarvojen liipaisulla (time record averaging). Liipaisu voidaan suorittaa ulkoisella signaalilla (external) tai sisäisesti (internal) käyttäen tutkittavaa signaalia. Signaalit, jotka ovat samenvaiheisia liipaisun kanssa, summautuvat keskiarvoaan kohti, kun taas melu ym. jaksottomuudet lähestyvät nollaa.

Kuva 4.1 /5, s.1/

Ylempi kuva esittää meluun hautautunutta pulssia. Alemmassa kuvassa on 100:n otoksen keskiarvoliiipaistu kuvaaja, josta ko. pulssi näkyy selvästi.



Signaali/melu suhde riippuu keskiarvojen määrästä N seuraavan kaavan mukaisesti /5/:

$$S/N(\text{dB}) = 20\log(N)^{0.5} \quad (4.1)$$

Keskiarvojen liipaisu on yksi keino erottaa signaaleita saman taajuussisällön omaavan melun seasta. Sitä voidaan käyttää

esimerkiksi kaikuluotainpulssien erottamiseen meren kohinas-
ta tai EKG -käyrien piirtämiseen potilaan lihas- ja hermopuls-
sien häiritsemättä.

4.1.2 Autokorrelaatio

Autokorrelaatio (autocorrelation) on keskiarvofunktio, joka
määritellään kaavalla /5/:

$$R_{XX}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T x(t)x(t+\tau)dt \quad (4.2)$$

Autokorrelaatio muodostetaan siis ottamalla signaali, kertomal-
la se samalla signaalilla siirrettynä ajalla τ ja ottamalla
tulosta keskiarvo koko "ikkunan" yli.

Käytännöllisyyssyistä useimmat digitaaliset signaalianalysaat-
torit muodostavat autokorrelaation käyttäen hyväksi sen yhteyt-
tä taajuustason tehospektriin (kohta 4.2.2):

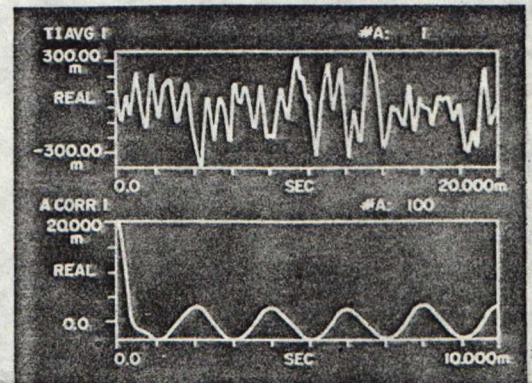
$$R_{XX}(\tau) \longleftrightarrow G_{XX}(f)$$

$$R_{XX}(\tau) = F^{-1}(G_{XX}(f)) = F^{-1}(S_X(f) \cdot S_X(f)^*) \quad (4.3)$$

Autokorrelaatiofunktioilla on aina maksimi kohdassa $\tau = 0$ vas-
taten $x(t)$:n neliöllistä keskiarvoa. Jos signaali $x(t)$ on jak-
sollinen, on autokorrelaatiokin jaksollinen ja sillä on sama
taajuus. Satunnaismelu korreloituu arvon $\tau = 0$ ympärille.

Kuva 4.2

Ylemmässä kuvassa on satunnaismelun ja siniaallon summa. Alemmassa
vastaava autokorrelaatio, josta si-
niaallon jaksollisuus näkyy hyvin.



4.1.3 Ristikorrelaatio

Ristikorrelaatio on mitta kahden signaalin samanlaisuudesta.

$$R_{yx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_T y(t)x(t+\tau)dt \quad (4.4)$$

Se muodostetaan analysaattorissa autokorrelaation tapaan käyttäen yhteyttä ristitehospektriin:

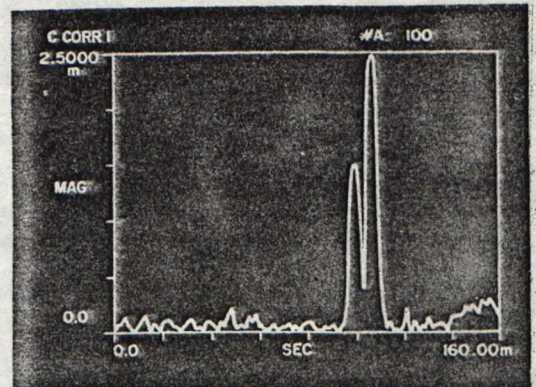
$$R_{yx}(\tau) \longleftrightarrow G_{yx}(f)$$

$$R_{yx}(\tau) = F^{-1}(S_y(f) S_x(f)) \quad (4.5)$$

Ristikorrelaatio (cross correlation) osoittaa kahden signaalin samanlaisuuden aikaeron funktiona. Sen paras käyttömuoto on signaalien välisten vaihe-erojen tutkiminen. Signaalit voivat olla impulsseja kuten tutkissa ja kaikuluotaimissa tai laajakaistaista satunnaisvärähtelyä kuten melumittausten yhteydessä.

Kuva 4.3 /5, s.4/

Ristikorrelaatiota voidaan käyttää esim. melun kulureittien löytämiseen. Kuvassa on kaksi piikkiä, joiden välinen aikaviive edustaa niiden kulureittien aiheuttamaa viivettä sähköpiirissä.



4.1.4 Impulssivaste

Impulssivaste (impulse response) kuvaa impulssin siirtymistä kahden pisteen A ja B välillä. Pisteeseen A oletetaan annetuksi äärettömän lyhytaikainen, mutta suuruudeltaan äärellinen impulssi. Impulssivaste $h(t)$ kuvaa tästä aiheutuvaa värähtelyä pisteessä B. Se lasketaan siirtofunktion $H(f)$ avulla:

$$h(t) = F^{-1}(H(f)) \quad (4.6)$$

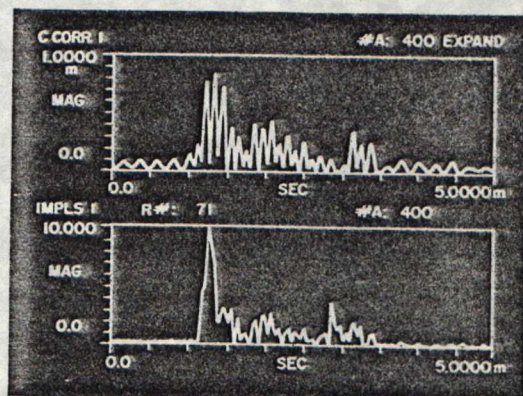
Impulssivastetta käytetään värähtelyn kulkureittien sekä värähtelymuotojen tutkimiseen. Ristikorrelaation, autokorrelaation ja impulssivasteen välillä on yhteys:

$$R_{yx}(\tau) = h(t) * R_{xx}(\tau)$$

eli ristikorrelaatio on impulssivasteen ja autospektrin konvoluutio. Konvoluutio on määritelty liitteessä 1.

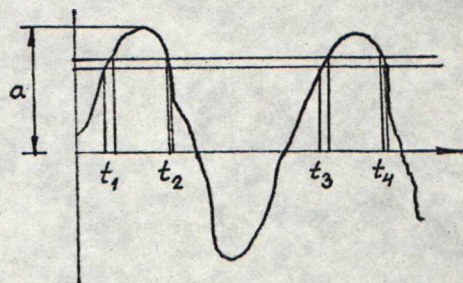
Kuva 4.4 /5, s.5/

Kaiutin/mikrofoni järjestelmän mittaustulokset. Mikrofonin oli sijoitettu normaaliin huoneympäristöön 30 cm:n päähän kaiutimesta. Kolmen millisekunnin aikaviive näkyy alemmasta impulssivasteen kuvasta paremmin kuin ylempää ristikorrelaatiosta.



4.1.5 Amplitudihistogrammi

Amplitudihistogrammiin rekisteröidään värähtelevän pisteen amplitudiarvojen (esim. kiihtyvyyksien) esiintymistiheydet. Histogrammi konstruoidaan kuvassa 4.5 esitetyllä tavalla. Amplitudiväli jaetaan ensin pieniin kaistoihin ja värähtelyn viipymäajat kussakin kaistassa summataan erikseen. Kuvaan on piirretty esimerkkinä yksi kaista ja sen viipymäajat t_1, t_2, \dots . Ne lasketaan yhteen, jolloin saadaan ko. kaistalla viipymisen yhteenlaskettu aika tarkasteluvälillä T . Näiden kaista-aikojen suhde T :hen antaa kyseistä kaistaa vastaavan esiintymis-



Kuva 4.5 /3, s.6/

Amplitudihistogrammin muodostaminen

tiheyden ts. todennäköisyyden, että värähtely on kyseisellä amplitudivälillä. Piirtämällä tiheyslukuja vastaavat patsaat vaakasuoraan asetetulle amplitudiakselille saadaan amplitudihistogrammi. Käytännössä em. amplitudivälit ovat erittäin kapeita, samoin myös patsaat. Amplitudihistogrammia kuvaava pylväsdiagrammi antaa vaikutelman jatkuvasta käyrästä.

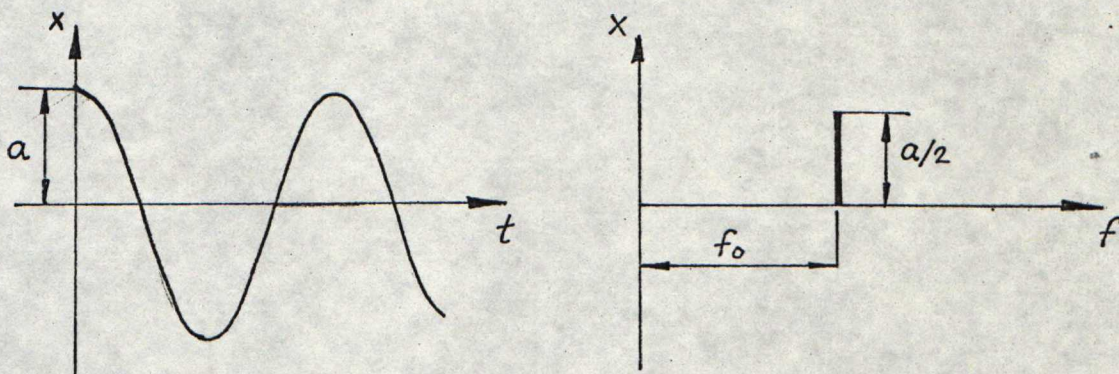
4.2. Taajuustason funktiot (spektrianalyysi)

4.2.1 Lineaarinen spektri

Lineaarinen spektri (linear spectrum) on aikasignaalin $x(t)$ Fourier-muunnos:

$$S_x(f) = F(x(t)) \quad (4.7)$$

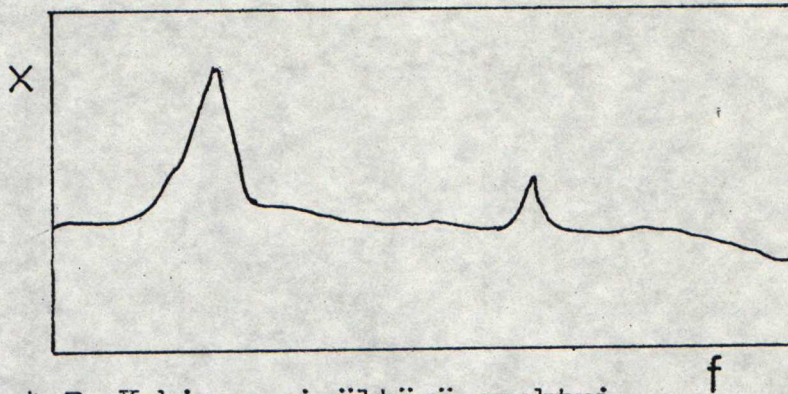
Lineaarinen spektri kuvaa värähtelyn amplitudia ja vaihekulmaa taajuuden funktiona. Sini- ja kosinikäyrien Fourier-muunnokset ovat ns. deltafunktioita siten, että $S_x(f)$ saa ko. sinivärähtelyn taajuudella f_0 tietyn, sinikäyrän amplitudista riippuvan arvon ja on muualla nolla, kuva 4.6 /3, s.7/.



Kuva 4.6 Aikavasteen Fourier-muunnos

Analysaattori tutkii peräkkäisillä taajuusarvoilla $f = n \Delta f$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) esiintyvän värähtelyn. Jos jollakin taajuudella esiintyy jaksollista värähtelyä, saa spektrifunktio $S_x(f)$ selvästi nolasta poikkeavan arvon. Käytännössä värähtely ei juuri koskaan koostu puhtaista sinikäyristä, vaan on sekoittunut satunnaissignaaleihin.

Värähtelyn spektri on käytännössä kuvan 4.7 kaltainen.



Kuva 4.7 Kohinaa sisältävä spektri

Digitaalisella signaalianalysaattorilla voidaan muodostaa ja tulostaa:

1. $S_x(f)$:n reaali-osa $R(f)$
2. $S_x(f)$:n imaginääri-osa $I(f)$
3. $S_x(f)$:n suuruus $|S| = \sqrt{R^2 + I^2}$
4. Vaihekulma $\phi = \arctan(I/R)$
5. Nyqvistin diagrammi (kompleksitasoesitys)

Satunnaishäiriöistä johtuen vain yhden lineaarisen spektrin laskeminen ei riitä, vaan spektri muodostetaan usean otoksen keskiarvosta (linear spectrum averaging).

4.2.2 Autospektri

Autospektri eli tehosppektri (auto power spectrum) helpottaa värähtelyssä esiintyvien tehohuippujen löytämistä:

$$G_{xx}(f) = S_x(f) S_x^*(f) \quad (4.8)$$

jossa $S_x^*(f)$ tarkoittaa kompleksiluvun $R+iI$ liittolukua $R-iI$ joten

$$G_{xx}(f) = \sqrt{R^2 + I^2} = S_x^2$$

Autospektri kuvaa värähtelyn tehoa taajuuden funktiona, jonka

vuoksi sitä kutsutaan myös tehospektriiksi. Autospektriä laskettaessa vaihekulmainformaatio häviää.

Autospektri sopii käytettäväksi tutkittaessa jaksollista värähtelyä, kun taustamelu on voimakas tai tutkittaessa taajuudeltaan vaihtelevan herätteen vaikutusta mitattavaan systeemiin. Käyttöalue on lähinnä resonanssitaajuuksien selvittäminen.

4.2.3 Ristispektri

Ristispektri (cross power spectrum) on kahden signaalin $x(t)$ ja $y(t)$ Fourier-muunnosten tulo:

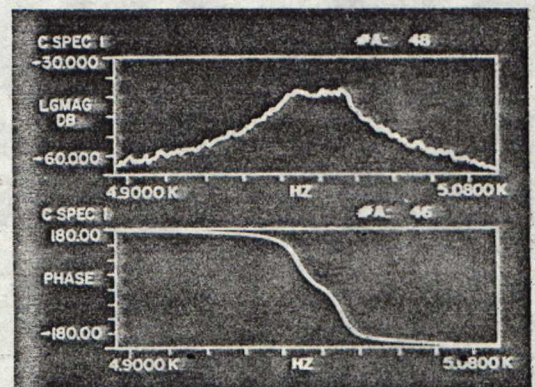
$$G_{yx}(f) = S_y(f) S_x(f) \quad (4.9)$$

Se kuvaa kahden signaalin yhteistä tehoa taajuuden funktiona ja sisältää myös vaihe-erotiedon.

Ristispektriä käytetään tutkittaessa kahden signaalin välistä vaihekulmaa eri taajuuksilla. Ristispektrin suuruus riippuu kummankin mitattavan signaalin suuruudesta. Kun molemmat ovat suuria, ristispektri on korkea ja kun molemmat ovat pieniä, ristispektri on matala. Ristispektri on tästä syystä käyttökelpoinen, kun halutaan erottaa signaalien yhteiset suuret komponentit. Kuitenkin on muistettava, että ristispektrissä saattaa olla komponentteja, jotka ovat suuria vain toisessa mitattavista signaaleista.

Kuva 4.8 /5, s.10/

Ristispektri rakenteen kahdesta lähekkäisestä moodista. Kahden resonanssin olemassaolo ei näy selvästi ylemmästä suuruutta esittävistä kuvasta, mutta käy hyvin ilmi alemmasta vaihesiirron kuvaajasta.



4.2.4 Siirtofunktio

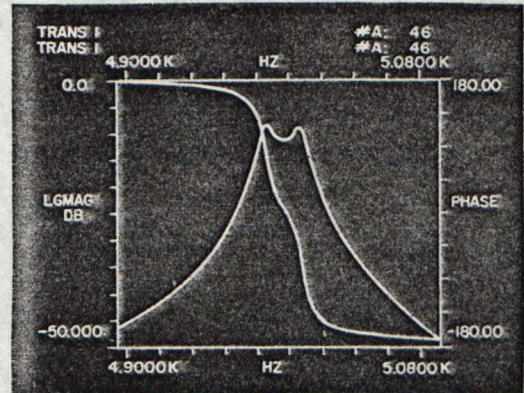
Aiemmin esitelty siirtofunktio (transfer function) on siis yksi monista tavoista tarkastella värähtelyä. Se muodostetaan ristispektrin ja autospektrin osamäärästä:

$$H(f) = \frac{G_{yx}(f)}{G_{xx}(f)} \quad (4.10)$$

Siirtofunktiota käytetään värähtelyn siirtymisen tutkimiseen sekä värähtelymuotojen ja vaimennuksen määrittämiseen. Mitattavista suureista ja laskentamenetelmistä riippuen siirtofunktiolla on useita nimiä: taajuusvaste, systeemivaste, mekaaninen impedanssi jne.

Kuva 4.9

Kuvan 4.8 moodit esitettynä siirtofunktion avulla. Huomaa että siirtofunktiolla ja ristispektrillä on sama vaihe.



4.2.5 Koherenssifunktio

Koherenssifunktion lauseke on:

$$\gamma^2(f) = \frac{G_{yx}(f) G_{yx}(f)}{G_{xx}(f) G_{yy}(f)} \quad (4.11)$$

Se kuvaa taajuuden funktiona tutkittavien signaalien riippuvuutta toisistaan. Koherenssifunktiota käytetään siirtofunktiomittauksen luotettavuuden toteamiseen, signaali/kohina suhteen määrittelyyn ja spektrin $G_{yy}(f)$ painofunktiona.

Koherenssifunktio indikoi, mikä osuus signaalista $y(t)$ johtuu signaalista $x(t)$ eri taajuuksilla. Jos koherenssi on yksi, on $y(t)$ kokonaan $x(t)$:n aiheuttama, jos se on ykköistä pienempi

ei $y(t)$:n kaikkia komponentteja ole saatu mitattua tai systeemissä on kohinaa. Jos koherenssi on nolla, ei $y(t)$ riipu lainkaan $x(t)$:stä.

Signaali/kohina suhde ilmaistaan koherenssin avulla:

$$\frac{S(f)}{N(f)} = \frac{\gamma^2(f)}{1 - \gamma^2(f)} \quad (4.12)$$

5. HERÄTETYYYPIT

Värähtelymittauksissa tavallisimmin käytetyssä analogiamenetelmässä kukin moodi viritetään värähtelemään ominaistaajuudellaan täristimien avulla. Korkeampien taajuuksien esiinsaamisessa tämä menetelmä vaatii aikaa ja melkoista kokemusta kokeen suorittajilta. Kun moodi on saatu viritettyä, seuraava vaihe on tiedon keruu ja analysointi. Jos käytettävissä ei ole pitkälle kehitettyä tietojenkäsittelyjärjestelmää, joudutaan tässä vaiheessa tekemään runsaasti virhemahdollisuuksia sisältävää käsityötä.

Yksi digitaalisten signaalianalysointilaitteiden suurimmista eduista on se, että ne pystyvät muodostamaan tarkkoja siirtofunktioita monenlaisten herätemenetelmien avulla. Analogiamenetelmät vaativat aina sinimuotoista herätettä. Signaalianalysointilaitteen ainoa vaatimus heränteelle on, että se sisältää energiaa tutkitavilla taajuuksilla. Seuraavassa tarkastellaan yleisimpiä herätemenetelmiä lähteen 6 mukaisesti.

5.1 Satunnaisheräte

Puhtaasti satunnainen heräte (pure random) on normaalijakautunut ja sen luonteenomainen piirre on jaksottomuus. Erillisen signaaligeneraattorin ulostulo voidaan johtaa täristimeen suodattimen kautta, jolloin energia keskittyy halutulle taajuuskaistalle. Signaalin spektri on laakea, josta syystä vain energian yleinen taso on helposti kontrolloitavissa.

Yksi puhtaan satunnaisherätteen haitoista on se, että vaikkakin täristintä ohjataan laakealla sisääntulospektrillä, rakenteeseen välittyvä spektri eroaa tästä rakenteen ja täristimen välisestä välyksestä johtuen. Tämä vaikeuttaa rakenteen täristämistä optimaalisella tavalla.

Mitattujen signaalien jaksottomuus analysointilaitteen mittausikkunassa on edellistä pahempi haitta. Digitaalisen Fourier-analyysin perusolettamushan on aika-aaltojen tarkka jaksollisuus ikkunassa. Jos tämä ehto ei ole täytetty, antaa diskreetti Fou-

rier-muunnos "vuotoa" tarkasteltavaan spektriin. Vuoto tarkoittaa sitä, että signaalin jaksottomista osista vuotaa energiaa jaksollisiin osiin, mikä heikentää tuloksen tarkkuutta.

Digitaalisissa signaalianalysointilaitteissa jaksoton aikataso tieto kerrotaan luvussa 3 esitetyllä painofunktiolla vuodon vähentämiseksi.

Kun herätteenä käytetään puhdasta satunnaissignaalia, jokainen T sekunnin mittainen otos eroaa sitä edeltävistä ja seuraavista otoksista. Näinollen epälineaarisuudet ja melu voidaan poistaa mittauksesta muodostamalla usean peräkkäisen taajuustason otoksen keskiarvo. Keskiarvojen määrän lisääntyessä kaikki jaksottomat komponentit lähestyvät nollaa - tämä on satunnaisherätteen merkittävin etu.

5.2 Pseudo -satunnaisheräte

Epäjatkuvan signaalin vuotojen välttämiseksi voidaan käyttää pseudo -satunnaisherätettä (pseudo random). Tämän tyyppinen heräte voidaan järjestää helposti analysointilaitteen AD -muuntimella. Yleisimmin käytetystä signaalista käytetään nimitystä nollavarianssi satunnaismelu (zero variance random noise).

Signaali muodostetaan analysointilaitteen tietokoneessa ja johdetaan täristimeen AD -muuntimen kautta. Signaali lähtee T sekunnin välein ja otoksen pituus on täten sama kuin mittausjakson pituus ja se on tarkalleen jaksollinen mittausikkunassa (kuva 5.1).

Pseudo -satunnaisheräte sopii mittauksiin, joissa systeemi käyttäytyy lineaarisesti ja ulkopuolisen melun osuus on vähäinen. Menetelmän haittana on se, etteivät epälineaarisuudet ja rakenteen välysten aiheuttamat jaksollisuudet häviä keskiarvoja ottaamalla, koska ne toistuvat samanlaisina joka otoksessa.

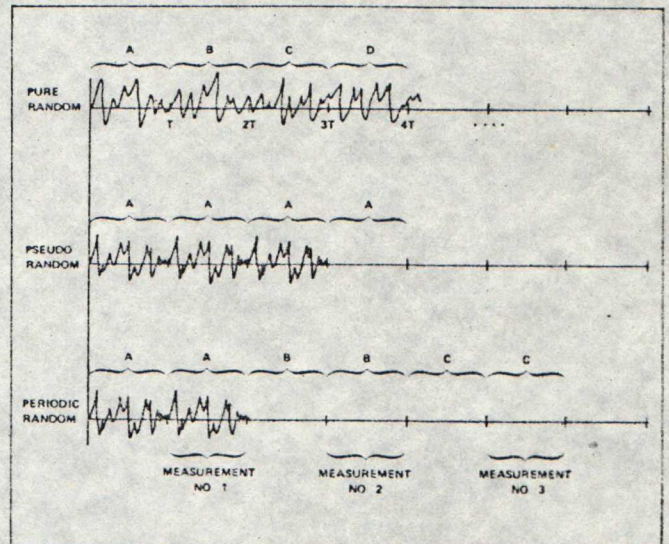
5.3 Jaksollinen satunnaisheräte

Jaksollisessa satunnaisherätteessä (periodic random) yhdistyvät edellämainittujen herätteiden hyvät puolet ilman niiden haittoja. Se täyttää jaksollisen signaalin vaatimukset mittausikkunassa, mutta muuttuu ajan mukana siten, että rakennetta täristetään täysin satunnaisesti.

Menetelmässä johdetaan ensin pseudo -satunnaissignaali AD -muuntimesta täristimeen. Mittaus suoritetaan transienttivaiheen jälkeen, jolloin rakenne värähtelee vakiotilassa. Tällöin muodostetaan input-, output- sekä ristispektrit. Tämän jälkeen ei jatketa enää samalla signaalilla, vaan muodostetaan uusi edellisen kanssa korreloimaton signaali. Uusi signaali herättää rakennetta uudessa vakiotilassa ja suoritetaan toinen mitaus (kuva 5.1).

Kuva 5.1

Puhtaasti satunnaisen, pseudosatunnaisen- ja jaksollisen satunnaisherätteen vertailu.



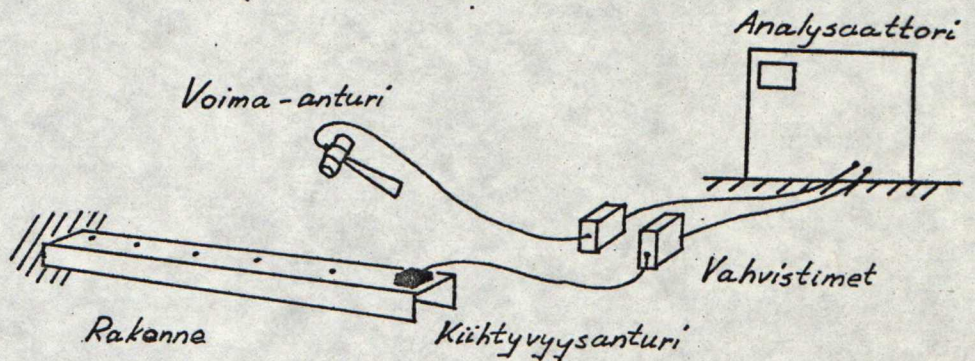
Kun useiden otosten tehospektrien keskiarvo on muodostettu, häviävät epälineaarisuudet ym. vääristymät siirtofunktiosta. Signaalin jaksollisuus eliminoi vuodot ja keskiarvojen ottaminen parantaa tulosta, sillä rakenteeseen kohdistuu erilainen heräte ennen jokaista mittausta.

5.4 Transienttivaiheen mittaus

Siirtofunktiot voidaan määrittää signaalianalysointorin avulla käyttäen transienttivaiheen mittausta, jolloin rakenteeseen ei tarvitse kytkeä mitään täristintä. Mittaus suoritetaan kohdis-

tamalla rakenteeseen lyhytaikaisia voimaimpulsseja, jotka herättävät kaikki ominaistaajuudet samanaikaisesti.

Tällainen "impulssitestaus" suoritetaan normaalisti vasaralla, johon on kytketty voima-anturi mittaamaan rakenteeseen kohdistettua voimaa. Vaste mitataan kiihtyvyyssanturilla. Kätevin tapa on sijoittaa kiihtyvyyssanturi yhteen paikkaan ja herättää rakennetta useista paikoista vasaralla (kuva 5.2). Järjestely vastaa täristinasennusta, jonka yhteydessä kiihtyvyyssanturin paikkaa muutellaan muotoja määritettäessä. Edellisessä tapauksessa mitataan siirtomatriisin 2.11 rivejä ja jälkimmäisessä sarakkeita - ts. on sama mitataanko pisteessä A vaikuttavan voiman vaste pisteessä B vaiko päinvastoin.



Kuva 5.2 Impulssitestaus

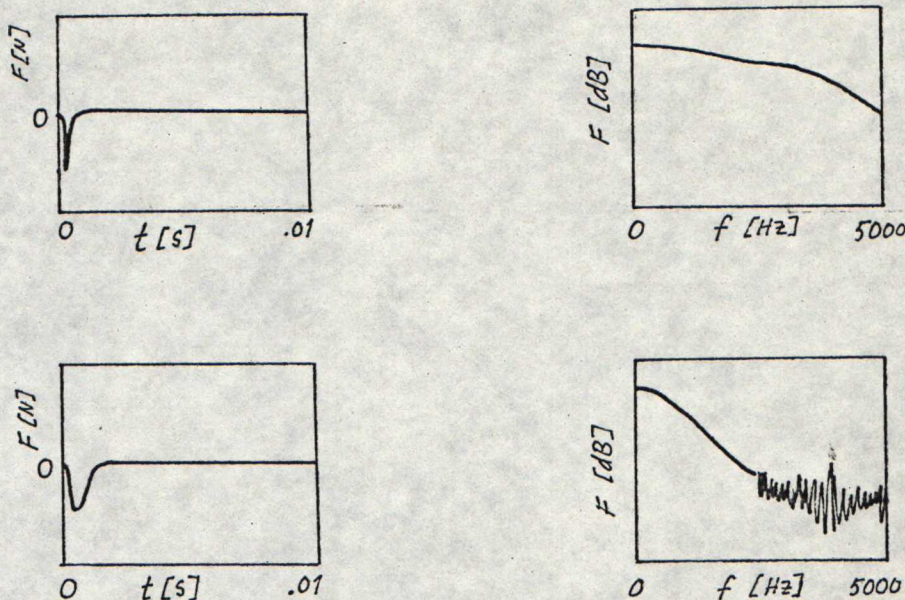
Impulssitestauksella on useita etuja:

1. Testattavaa rakennetta ei tarvitse tukea täristinasennusta varten.
2. Kalliita sähkömekaanisia täristimiä vahvistimineen ei tarvita.
3. Menetelmä on useissa tapauksissa erittäin nopea.

Haitoista pahin on se, ettei rakenteeseen kohdistetun voiman tehospektri ole kontrolloitavissa yhtä helposti kuin täristinä käytettäessä. Tämä aiheuttaa eroja peräkkäisten mittausten välille.

Impulssivoimaa voidaan muuttaa käyttämällä eri kovuisia vasaran

päitä. Tämä puolestaan muuttaa tehospektriä. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että mitä leveämpi voimaimpulssi on, sitä alhaisempi taajuusalue tulee herätettyä.



Kuva 5.3

Ylemmässä kuvassa on kovapäisen vasaran impulssi ja tehospekttri, alemmassa pehmeäpäisen.

Kovapäistä vasaraa käytetään korkeampien taajuuksien herättämiseen, kun taas pehmeäpäisellä saadaan enemmän energiaa alemmille taajuuksille.

Impulssin aikaansaama energiatiheys on usein pieni, koska se jakaantuu leveälle taajuuskaistalle. Tämä aiheuttaa pulmia, kun testataan suuria ja voimakkaasti vaimennettuja rakenteita, sillä mittauksen signaali/melu -suhde jää alhaiseksi. Keskiarvojen muodostaminen parantaa tilannetta ja niitä tarvitaan useita.

Riittävän resoluution saavuttaminen on siirtofunktioittauksen elinehto. Transienttivaihesignaalin luonne asettaa käytännön rajoituksia resoluutiolle. Heikosti vaimennettujen resonanssien esiinsaamiseksi tarvitaan suuri joukko mittauspisteitä ts. Fourier-muunnoksen koon on oltava suuri:

$$\Delta f = \frac{\text{suurin tutkittava taajuus}}{0.5 \times \text{Fourier-muunnos}} = \frac{1}{T} \quad (5.1)$$

Kaavassa Δf on siis resoluutio ja T on mittausaika.

Kun rakenteen värähtely vaimenee nollaa kohti, tulee signaali/melu -suhde pienemmäksi ja pienemmäksi. Jos mittaus ei lopu ennen kuin suhde on hyvin pieni, muodostuu Fourier-muunnos pääosin melusta.

Vaatimukset hyvästä resoluutiosta ja signaali/melu -suhteesta ovat täten ristiriidassa keskenään. Edellinen vaatii pitkää mittausaikaa ja jälkimmäinen lyhyempää. Kuhunkin tapaukseen sopiva kompromissi löytyy vain kokemuksen myötä.

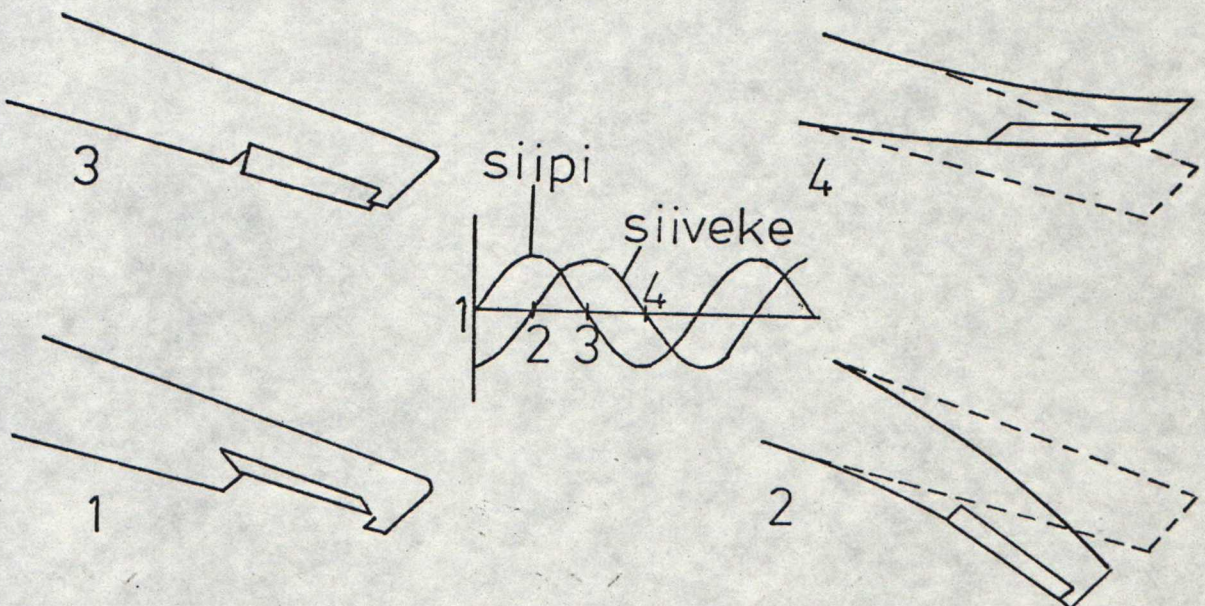
6. LENTOKONEEN MAAVÄRÄHTELYKOKEET

6.1 Yleistä

Lentokoneelle suoritettavat maavärähtelykokeet (ground vibration tests, standschwingungsmessungen) ovat keskeinen osa analyttis-kokeellista prosessia, jolla varmistetaan, ettei koneelle suunnitellulla sallitulla nopeusalueella esiinny vaimentumatonta aeroelastista värähtelyä eli flutteria.

Flutteri määritellään äkilliseksi ilmakehän herättämäksi värähtelyksi, joka tietyn kullekin flutterimoodille ominaisen kriittillisen nopeuden jälkeen ei enää vaimene, vaan voimistuu ja voi rikkoa rakenteen jopa sekunnin murto-osassa.

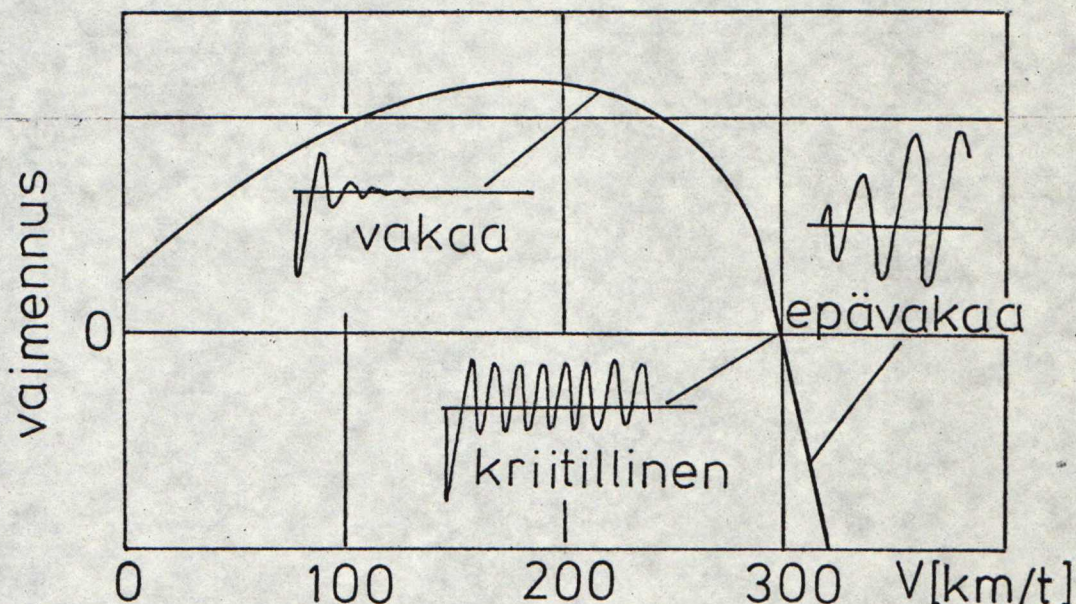
Tyypillistä flutterille on, että sen esiintyminen vaatii vähintään kahden rakenteen vapausasteen osallistumista värähtelyyn. Näin ollen esimerkiksi yksinään saranaviivansa ympäri värähtelevä siiveke ei aiheuta flutteria, ellei se saa esim. siiven taivutusvärähtelyä mukaansa. Kuvassa 6.1 on esitetty siivekkeen rotaation ja siiven taivutusvärähtelyn muodostaman flutterin periaate.



Kuva 6.1 Siivekkeen rotaation ja siiven taivutusvärähtelyn aikaansaama flutteri

Flutteri alkaa kriitillisellä lentonopeudella aiheutetusta siivekepoikkeutuksesta (piste 1), jonka vaikutuksesta siipi taipuu asemaan 2. Asemassa 2 rakenteen kimmoiset voimat pysäyttävät taipumaliikkeen, siiveke heilahtaa hitausvoimien vaikutuksesta alkuperäiseen poikkeutukseen nähden toiselle puolelle (piste 3) ja siipi heilahtaa toiselle puolelle, kunnes kimmoiset voimat pysäyttävät sen asemassa 4. Värähtely saa energiaa ilmavirtauksesta ja amplitudi kasvaa kunnes rakenne murtuu.

Kriitillistä nopeutta pienemmillä nopeuksilla rakenteen vaimennus estää flutterin kehittymisen (kuva 6.2), kriitillisen nopeuden jälkeen ei useinkaan ole enää mitään tehtävissä.



Kuva 6.2 Tyypillisen flutterimoodin vaimennus lentonopeuden funktiona vastaavine amplitudeineen stabiililla, kriitillisellä ja epästabiililla nopeusalueella.

Flutterissa kaikki lentokoneen osat värähtelevät enemmän tai vähemmän, eri värähtelymuotoja voidaan luokitella sen perusteella, mitkä vapausasteet siihen pääasiallisesti osallistuvat:

1. Taivutus - vääntö flutteri
siipi
2. Ohjainpinnan värähtely saranaviivaa vastaan kohtisuoran akselin ympäri
 - a) Siiven taivutus/siivekkeen rotaatio
 - b) Rungon vääntö/sivuperäsimen rotaatio
 - c) Sivuvakaimen taivutus/sivuperäsimen rotaatio
 - d) Korkeusvakaimen taivutus/korkeusperäsimen rotaatio
 - e) Rungon vääntö/epäsymm. korkeusperäsimen rotaatio
3. Ohjainpinnan värähtely yhdensuuntaisen akselin suhteen
 - a) Siiven vääntö/siivekkeen rotaatio
 - b) Rungon sivuttaistaivutus/sivuperäsimen taivutus
 - c) Rungon pystytaivutus/korkeusperäsimen taivutus
 - d) Sivuvakaimen vääntö/sivuperäsimen rotaatio
 - e) Korkeusvakaimen vääntö/korkeusperäsimen rotaatio

Näistä on edelleen johdettavissa useampikomponenttisia värähtelyitä, mutta on osoittautunut, että edellämainitut muodostavat suurimman osan käytännön tilanteista.

Elastisella rakenteella on asiallisesti ottaen äärettömän monta vapausastetta, mutta tarkasteluja varten on rajoituttava alempien harmonisten värähtelyjen taajuuksille. Tarkasteltavien ominaistajuuksien yläraja yleisilmailu- ja purjelentokoneille on tyypillisesti alle 100 Hz.

Analyttisten flutterilaskelmien perusteella määritetään kunkin värähtelymoodin vaimennuksen riippuvuus lentonopeudesta ja varmistetaan, ettei se mene nolleen koneen sallitulla nopeusalueella. Elementtimenetelmää käytettäessä flutteriyhtälö kirjoitetaan /7/:

$$(K(I + iG) - \omega^2 M + qA)w = 0 \quad (6.1)$$

jossa K , G , M ja A ovat jäykkyyssmatriisi, rakenteellinen vaimennusmatriisi, yleistetty massamatriisi ja epästationääristen aerodynaamisten voimien matriisi. Ominaiskulmanopeutta merkitään ω :lla ja i sekä w ovat imaginääriyksikkö ja vapausastevektori.

Maavärähtelykokeiden avulla määritetään laskuja varten rakenteen ominaiskulmanopeudet, värähtelymuodot, rakenteellinen vaimennus ja yleistetyt massat (kts. kohta 6.5). Epästationääriset aerodynaamiset voimat lasketaan erilaisilla kantopinta-teorioilla tms. tai sitten nojaututaan kokeellisiin parametreihin (tuulitunnelikokeet).

Pienille yleisilmailu- ja purjelentokoneille ei viime vuosiin asti ole normaalisti suoritettu flutterianalyysiä maavärähtelykokeineen ja laskelmineen. Pääsyyinä tähän on ollut tarvittavan laitteiston kalleus ja menetelmien monimutkaisuus. Koneiden suunnittelu flutterin osalta on perustunut kokemuksen tuomaan tietoon ja melko konservatiivisiin jäykkyys- ja massatasapainotuskriteereihin.

Sekä pienten moottorilentokoneiden suunnittelussa käytettävä FAR-23 (Federal Aviation Regulations) /8/ että purjelentokoneiden suunnittelussa käytettävät OSTIV:in määräykset (Organisation Scientifique et Technique Internationale du Vol a' Voile) /9/ vaativat maavärähtelykokeiden suorittamista. Edellisessä on pyöreähkö vaatimus "rakenteen pääkomponenttien ominaisvärähdyslukujen ja -muotojen" määrittämisestä. OSTIV vaatii mitattavaksi seuraavien ominaisvärähtelymuotojen taajuuudet: siiven ensimmäinen symmetrinen ja epäsymmetrinen taivutus, siiven vääntö, rungon sivu- ja pystytaivutus, rungon vääntö, korkeus- ja sivuvakaimen taivutus sekä siivekkeiden, laskusiivekkeiden, korkeusperäsimen, sivuperäsimen ja lentojarrujen rotaatio saranaviivansa ympäri.

Kokeiden suorittamisesta tai tulosten tulkinnasta ei kumpikaan lähde mainitse mitään. Sen sijaan saksalaiset LFSM määräykset (Lufttüchtigkeitsforderungen für Segelflugzeuge und Motorsegler) vaativat koneen flutterittomuuden osoittamista myös laskennallisesti eikä ko. viranomaisen suorita tyyppihyväksyntää pelkästään koelentojen perusteella. Sama vaatimus sisällytettäneen myös tekeillä oleviin yhteiseurooppalaisiin JAR -määräyksiin (Joint Airworthiness Requirements).

Pienten moottori- ja purjelentokoneiden osalta ei välttämättä kuitenkaan vaadita täydellistä analyysiä so. yhtälön 6.1 rat-

kaisemista, kuten on tehty esim. lähteessä /11/ ASW-15 purjelen-
tokoneelle. Laskennolliseksi flutterittomuuden osoittamiseksi
hyväksytään myös maavärähtelykokeissa saatujen tulosten vertai-
lu lähteessä /12/ esitettyihin tilastollisiin parametreihin.

Maavärähtelykokeista saatuja ominaistajuuksia ja värähtely-
muotoja käytetään myös massatasapainotettaessa ohjainpintoja
esim. lähteessä /13/ esitettyjen kriteerien perusteella. Näihin
kriteereihin on kuitenkin suhtauduttava tietyllä varauksella.
Esimerkiksi siivekkeen dynaaminen massatasapainotus suorite-
taan siiven ensimmäisen symmetrisen taivutusvärähtelyn perus-
teella - kun näin on menetelty, ei kyseinen tasapainotus vält-
tämättä päde epäsymmetriselle taivutukselle tai väännölle.

Etenkin purjellentokoneita, jotka ovat rakenteiltaan elastisia,
tuhoutuu lähes vuosittain flutterin johdosta. Pirston flutte-
ria esiintyy myös siiviltään jäykemmällä moottorilentokoneil-
la (Cessna Conquest 1978, Sportavia RS-180 1979). Koska maa-
värähtelykokeissa käytettävä laitteisto on viime aikoina mer-
kittävästi kehittynyt ja halventunut, on aihetta olettaa, että
viranomaiset kautta linjan tulevat lähitulevaisuudessa vaati-
maan koelentojen ohella flutterittomuuden analyttistä osoit-
tamista.

Flutterilaskujen suorittamisella koneen suunnitteluvaiheessa
on myös se hyöty, että ohjainten massatasapainotukset päästään
minimoimaan jo alunperin. Näin välttytään myöhemmin suoritetta-
vilta aikaavieviltä koelennoilta ja/tai useilta kiloilta tur-
haa massaa.

Seuraavassa tarkastellaan maavärähtelykokeissa tutkittavia vä-
rähähtelymuotoja sekä koemenetelmiä ja -laitteistoa.

6.2 Tutkittavat värähtelymuodot

Ylärajana maavärähtelykokeissa tutkittaville värähtelymuodoil-
le käytetään lähteen 14 mukaan tilastoihin perustuvaa toteamus-
ta, että jos moodin redusoitu taajuus

$$f = \frac{\omega l}{V} \geq 1.0 \quad (6.2)$$

ei flutteria esiinny. Yhtälössä ω on kulmanopeus (rad/s), l on referenssipituus (yleensä ko. kantopinnan keskijänteen puolikas) ja V on lentonopeus. Purjelentokoneiden osalla tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että siivelle tarkastellaan moodeja, joiden ominaistaajuus on alle n. 35 Hz ja pyrstölle moodeja, joiden ominaistaajuus on alle n. 45 Hz. Näiden lisäksi mitataan aina myös ohjainpintamoodit.

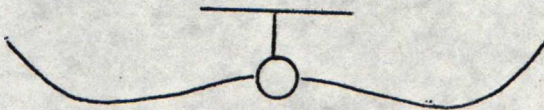
Tällä perusteella tullaan tulokseen, että maavärähtelykokeissa tulisi tutkia seuraavat moodit:

I Symmetriset moodit

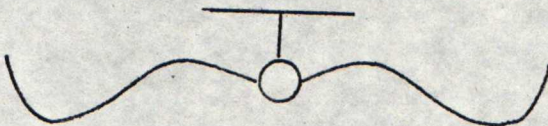
1....4. Siiven neljä ensimmäistä taivutusmoodia



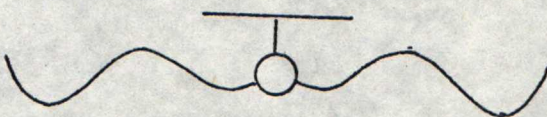
purjelentokoneet 2 - 3 Hz
1 - moottoriset pienkoneet 5 - 8 Hz



purjelentokoneet 8 - 10 Hz
1 - moottoriset pienkoneet 18 - 25 Hz

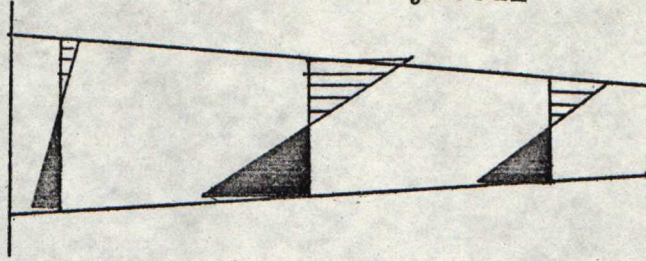


purjelentokoneet 20 - 25 Hz
1 - moottoriset pienkoneet 40 - 60 Hz



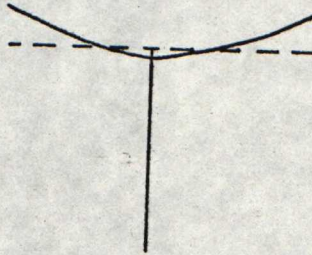
purjelentokoneet 35 - 45 Hz
1 - moottoriset pienkoneet 85 - 120 Hz

5. Siiven vääntövärähtelymoodi



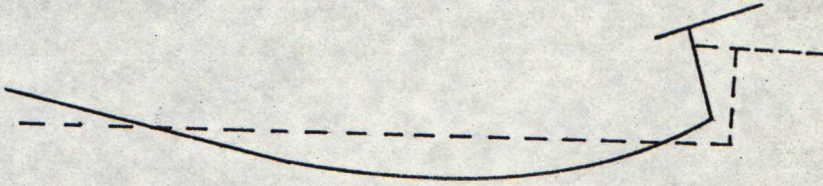
purjelentokoneet 20 - 30 Hz, 1-moott. pienkoneet 15 - 30 Hz

6. Korkeusvakaimen taivutusvärähtelymoodi



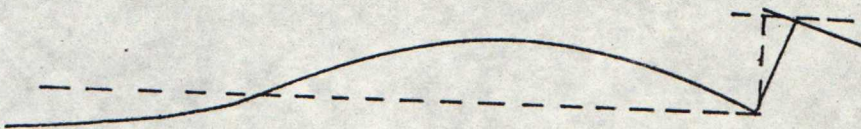
kertaluokkaa 10 - 20 Hz

7. Rungon ensimmäinen pystytaivutusmoodi



purjelentokoneet 7 - 10 Hz, 1-moott. pienkoneet 5 - 10 Hz

8. Rungon toinen pystytaivutusmoodi



kertaluokkaa 8 - 15 Hz

9. Jäykkä korkeusperäsinmoodi

Moodi on sellainen, että sauvan poikkeutusta vastaa oikean suuntainen peräsimen poikkeutus.

10. Ensimmäinen elastinen korkeusperäsinmoodi

Sauvan liikettä vastaa oikealle suunnalle vastakkainen peräsimen poikkeutus.

11. Symmetrinen siivekemoodi

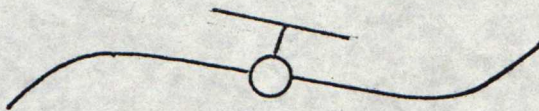
12. Symmetrinen laskusiivekemoodi

13. Symmetrinen yhdistetty siiveke-laskusiivekemoodi

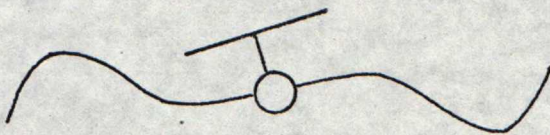
Siiveke ja laskusiiveke värähtelevät vastakkaisiin suuntiin, mutta symmetrisesti lentokoneen pituusakselin suhteen.

II Antisymmetriset moodit

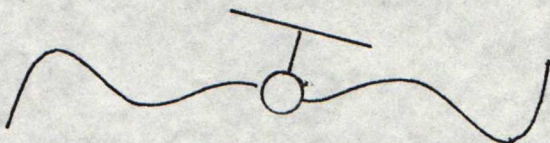
14....16. Siiven kolme ensimmäistä antisymmetristä taivutusvärähtelymoodia.



purjelentokoneet 5 - 7 Hz
1 - moottoriset pienkoneet
8 - 15 Hz

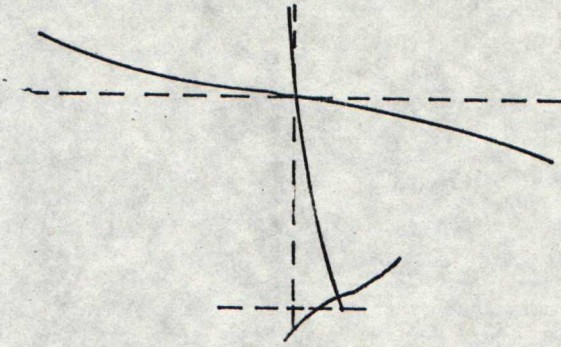


purjelentokoneet 14 - 17 Hz
1 - moottoriset pienkoneet
25 - 35 Hz



purjelentokoneet 25 - 35 Hz
1 - moottoriset pienkoneet
60 - 100 Hz

17. Yhdistetty rungon ja siiven sivutaivutusmoodi



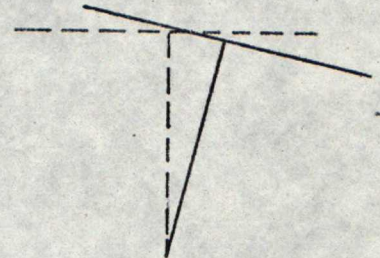
kertaluokkaa 7 - 10 Hz

18. Siiven antisymmetrinen vääntöväärähtelymoodi

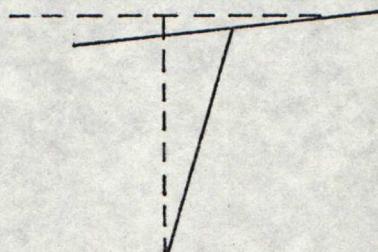
Oikealla ja vasemmalla siivellä on yleensä hieman erilaiset ominaistaajuuudet johtuen pienistä rakenne-epäsymmetrioista. Moodit ovat toisistaan käytännöllisesti katsoen riippumattomat ja muodoltaan lähes samat. Siiven vääntöväärähtelytaajuuksiksi otetaan näistä joko alempi tai keskiarvo; symmetriseksi muodoksi otetaan sitten sellainen, jossa molemmat siivet vääntyvät samaan suuntaan ja antisymmetriseksi sellainen, jossa ne vääntyvät vastakkaisiin suuntiin.

19. Ensimmäinen antisymmetrinen korkeusvakaimen moodi

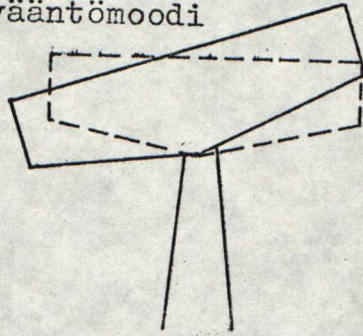
Sama kuin rungon vääntöväärähtelymoodi. Korkeus- ja sivuvakain pysyvät suunnilleen kohtisuorassa toisiaan vastaan. Kertaluokkaa 15 - 30 Hz.



20. Toinen antisymmetrinen korkeusvakainmoodi



21. Sivuvakaimen vääntömoodi



22. Antisymmetrinen siivekemoodi

23. Antisymmetrinen laskusiivekemoodi

24. Sivuperäsinmoodi

25. Antisymmetrinen yhdistetty siiveke-laskusiivekemoodi

26. Kolmas as. korkeusperäsinmoodi

Edellämainituista ainakin 20, 22, 23, 25 ja 26 ovat käytännössä varsin vaikeita saada esiin. Ohjainpintamoodien taajuudet riippuvat lähinnä ohjausjärjestelmän jäykkyydestä ja niistä on vaikea antaa tyypillisiä arvoja.

Yleisinä ohjeina koejärjestelyistä mainitaan /14/, /15/:

1. Kokeissa koneen tulee olla elastisesti ripustettu. Ripustuksen ominaistajuuden on oltava alle $\frac{1}{3}$ alimmasta rakenteen ominaistajuudesta. Alin ominaistajuus on yleensä siiven ensimmäinen symmetrinen taivutus. Pienten moottorilentokoneiden osalla tuentana voidaan käyttää myös koneen omaa laskutelinettä, kun rengaspaine vähennetään n. puoleen normaalista.
2. Kuhunkin moodiin liittyvät siirtymät mitataan kaikissa osissa rakennetta. Siten esimerkiksi mitattaessa peräsinmoodeja mitataan myös siiven siirtymät.
3. Ohjainpintamoodeja mitattaessa on sauvan oltava vapaana. Korkeintaan voidaan käyttää hyvin elastista kumirengasta

tms. pitämään sauva keskiasennossa.

4. Mitattaessa muita kuin varsinaisia ohjainpintamoodeja voidaan ohjainpinnat lukita "klemmareilla" varsinaiseen kantopintaan.
5. Ns. yleistetyt massat (kohta 6.5) määritetään kokeellisesti tai lasketaan siirtymämuotojen ja massajakautuman avulla. Edellinen tapa vaatii tarkkaa tietoa mittauksista, jälkimmäinen rakenteesta.
6. Ohjaamoon sijoitetaan ohjaajaa vastaava massa. Normaalit massanvaihtelut ja vesipainolasti voidaan ottaa huomioon myös jälkikäteen laskennollisesti.

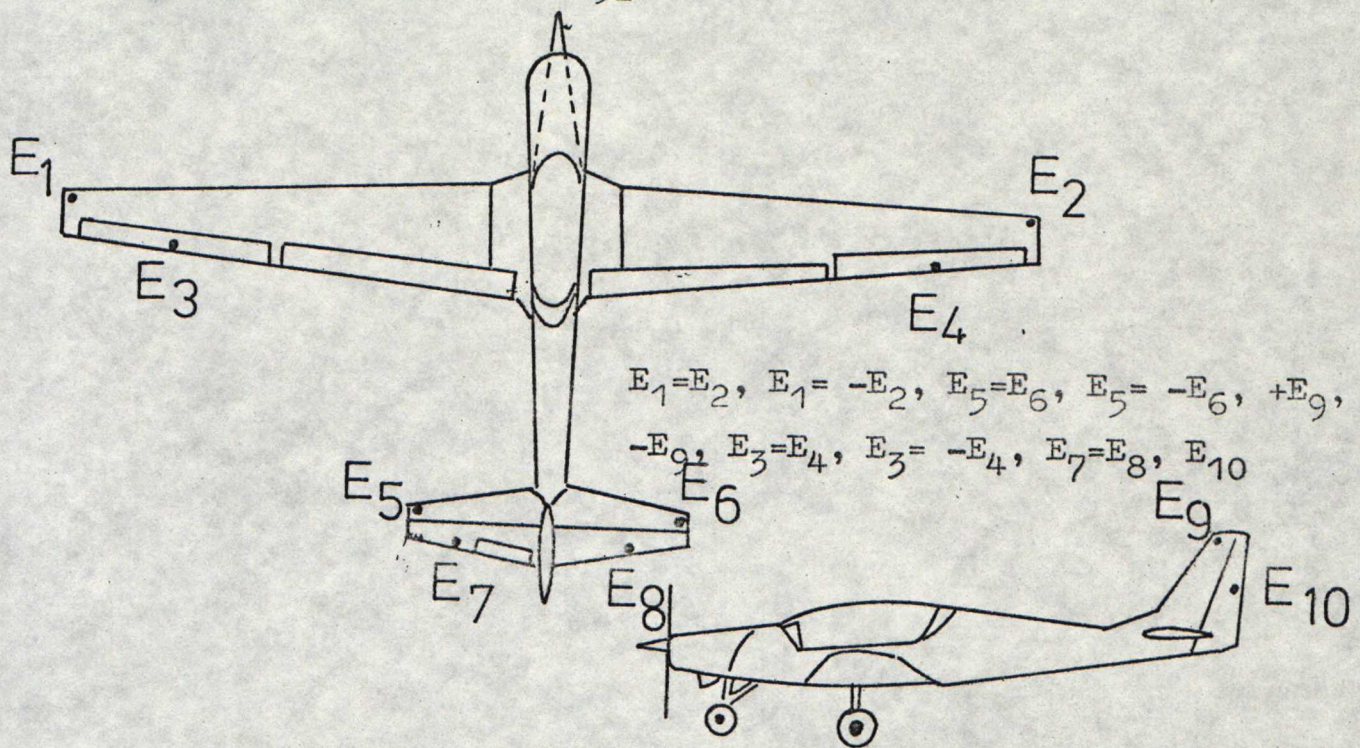
6.3 Klassinen menetelmä

Seuraavassa esitetään nk. klassinen menetelmä maavärähtelykokeiden suorittamiseksi. Sana klassinen rinnastuu tässä yhteydessä kohdassa 6.4 esiteltävään signaalianalysointorin käyttöön perustuvaan menetelmään. Lähteessä 16 yksinkertaisilla välineillä suoritettu PIK-20:n maavärähtelykoe on esimerkki klassisesta menetelmästä.

Kokeet suoritetaan kahdessa osassa /15/:

1. Kiinnostavalla taajuusalueella esiintyvien ominaistajuuksien alustava määrittäminen.
2. Kunkin ominaistajuuden yksityiskohtainen tutkimus.

Ensimmäisessä vaiheessa rakennetta herätetään sopivasti valituista pisteistä, kuva 6.3. Signaalin tulee olla laajakaistainen. Rakenteen vaste mitataan kiihtyvyyssantureilla useista kohdista. Kuvan 6.3 esimerkissä on kytketty 10 tärhistintä siiven ja vakaimien kärkiin sekä ohjainpintoihin. Sopiva tärhistimien lukumäärä riippuu tutkittavasta rakenteesta, pienten lentokoneiden yhteydessä käytetään yleensä neljää - viittä. Kiihtyvyyssanturien vähimmäismääräksi suositetaan /15/ kahtakymmentä.



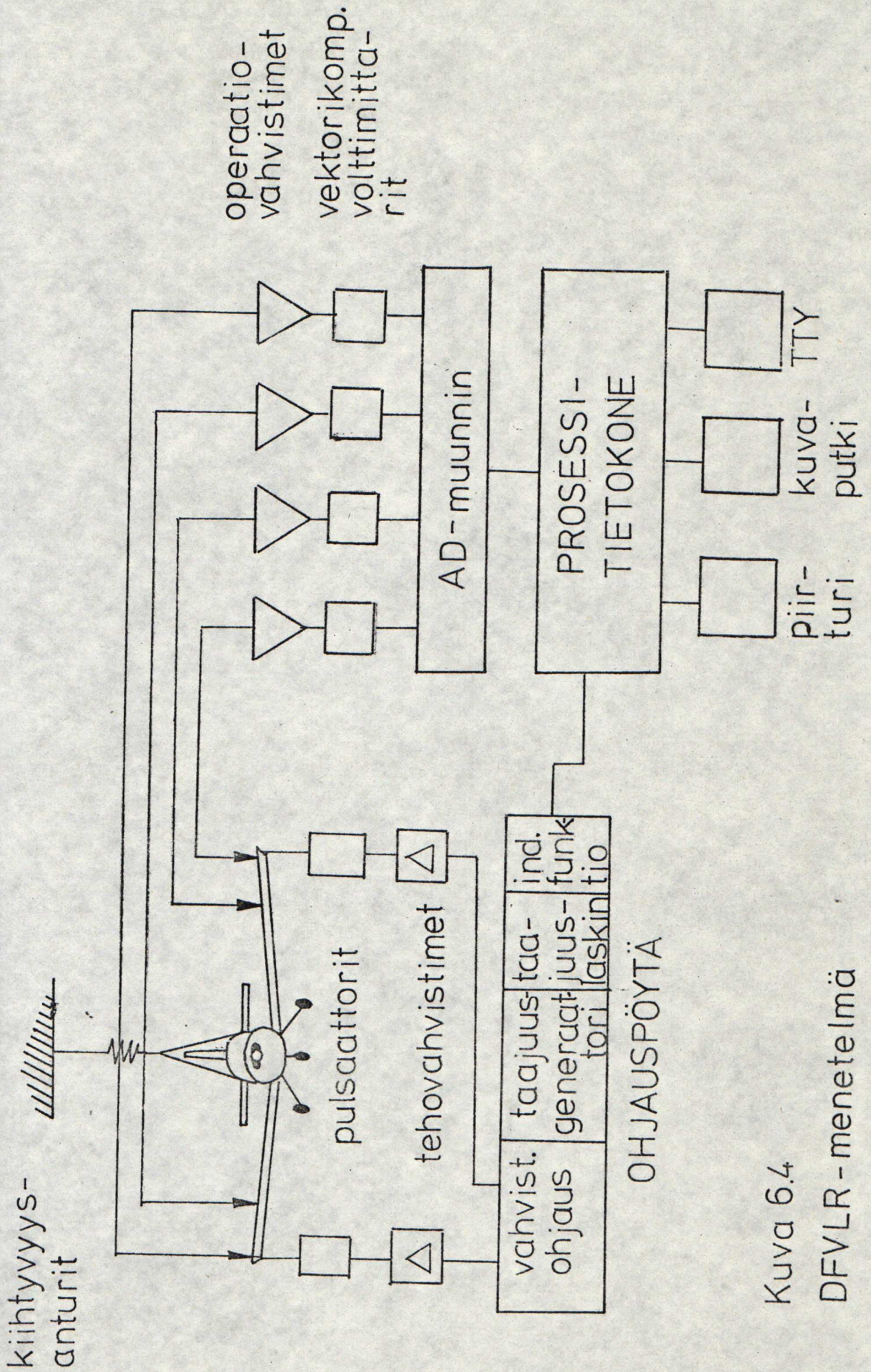
Kuva 6.3 Heräteyhdistelmät

Rakennetta täristetään kuvassa näkyvillä yhdistelmillä. Kutsakin yhdistelmää vastaava taajuusvaste tutkittavalta kaistalta otetaan piirturille. Heräteyhdistelmien valinnassa on oleellista, että niillä saadaan herätettyä kaikki tutkittavalla alueella esiintyvät moodit.

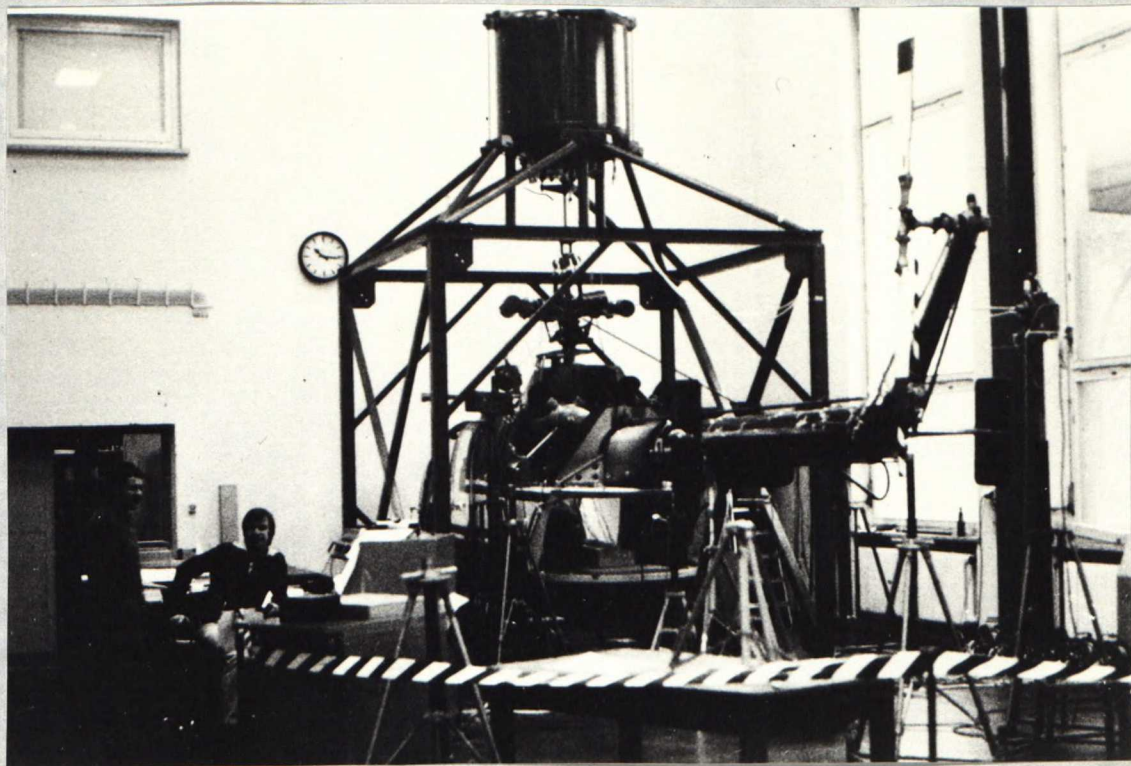
Seuraavassa vaiheessa eristetään eli "viritetään" kukin moodi. Moodin ominaistaajuus, värähtelymuoto, vaimennus ja yleistetty massa määritetään.

DVFLR:n (Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt) Göttingenin tutkimuslaitoksessa käytetään kuvan 6.4 mukaista laitteistoa /17/. Herättiminä käytetään sähkömagneettisia pulsaattoreita, joita ohjataan vahvistimien kautta ohjauspöydästä tulevalle signaalilla.

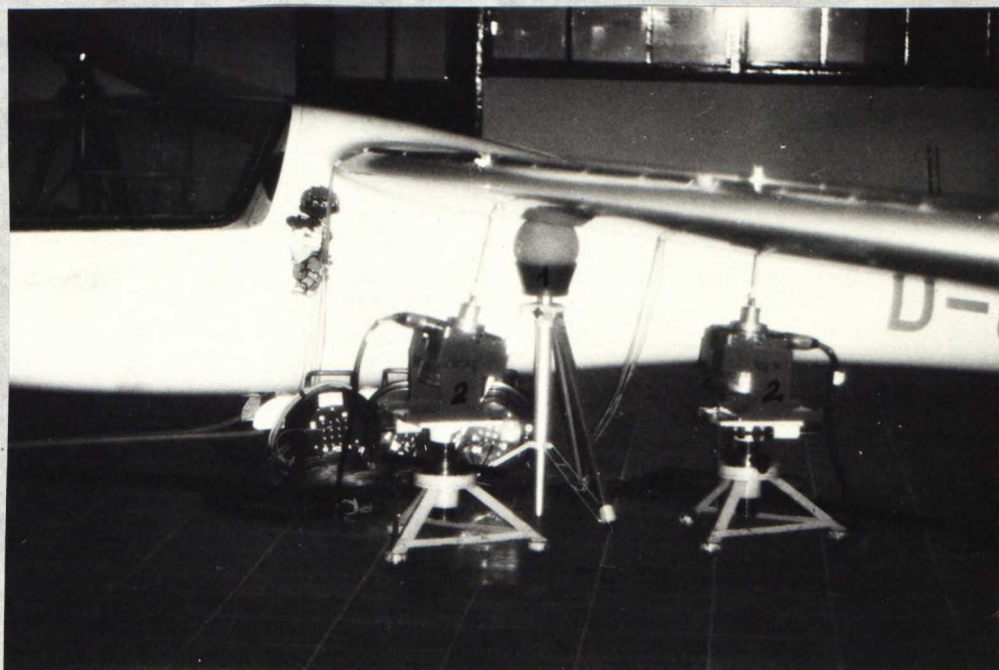
Pulsaattorien maksimilukumäärä on seitsemän. Kone tuetaan normaalisti kumikyösyillä kannatintelineeseen (kuva 6.5), mutta purjelentokoneiden yhteydessä käytetään yleensä kuvan 6.6 mukaista järjestelyä. Jalustoina ovat standardivalmisteiset kamerajalustat, joihin kuhunkin on kiinnitetty sorvattu kuppi, jossa puolestaan on ilmatäytteinen kumipallo. Tuet asetetaan kukin moodin solmukohtiin, jolloin niiden vaikutus eliminoiduu.



Kuva 6.4
DFVLR - menetelmä

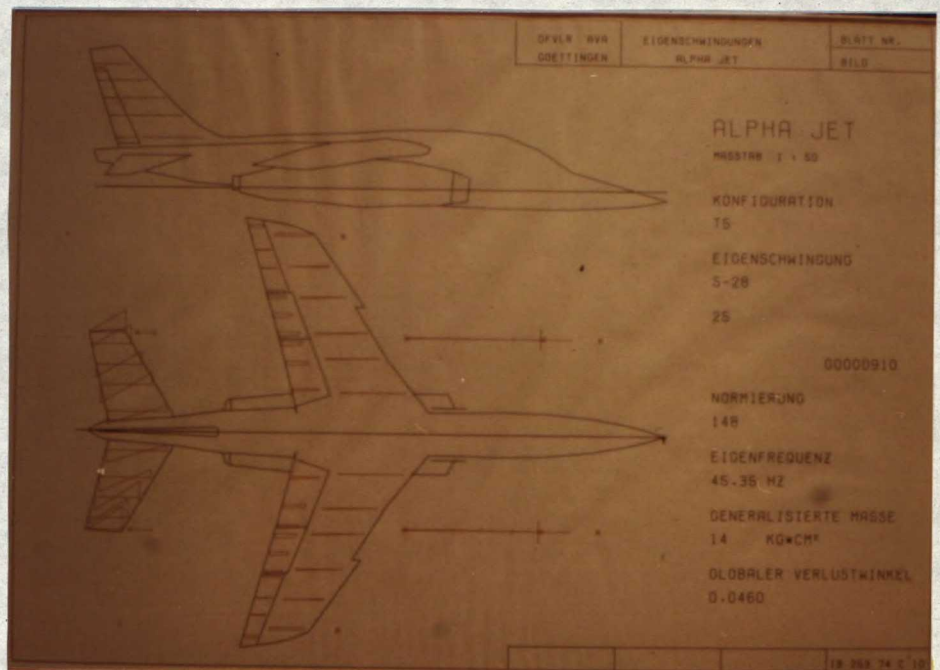


Kuva 6.5 Lentokoneiden ja helikoptereiden maavärähtelykokeissa käytettävä asennus. Kone on elastisesti ripustettu kannatintelineeseen ja pulsaattorit ovat tukien varassa. Vasemmalla ohjauspöytä.



Kuva 6.6 Purjelentokoneen tuenta. Kuvassa 1 on tukiteline, 2 on pulsaattori.

Kiihtyvyyssantureiden signaalit ohjataan etuvahvistimien kautta operaatiovahvistimiin, jotka integroivat kiihtyvyydet nopeuksiksi ja siirtymiksi. Vektorikomponenttivolttimittarit erottavat signaalista reaali- ja imaginääriosan, jotka syötetään AD-muuntimen kautta prosessitietokoneelle (PDP - 11/40 varustettuna graafisella yksiköllä DecGraphic 11/40 ja levymuistilla). Prosessitietokone tulostaa kuvat värähtelymuodosta kuvaputkelle ja piirturille, kuva 6.7.



Kuva 6.7 Prosessitietokoneen tulostama kuva lentokoneen korkeusperäsinmoodista. Tulostuksesta ilmenee muodon lisäksi ominaistaajuus, yleistetty massa ja vaimennuskulma.

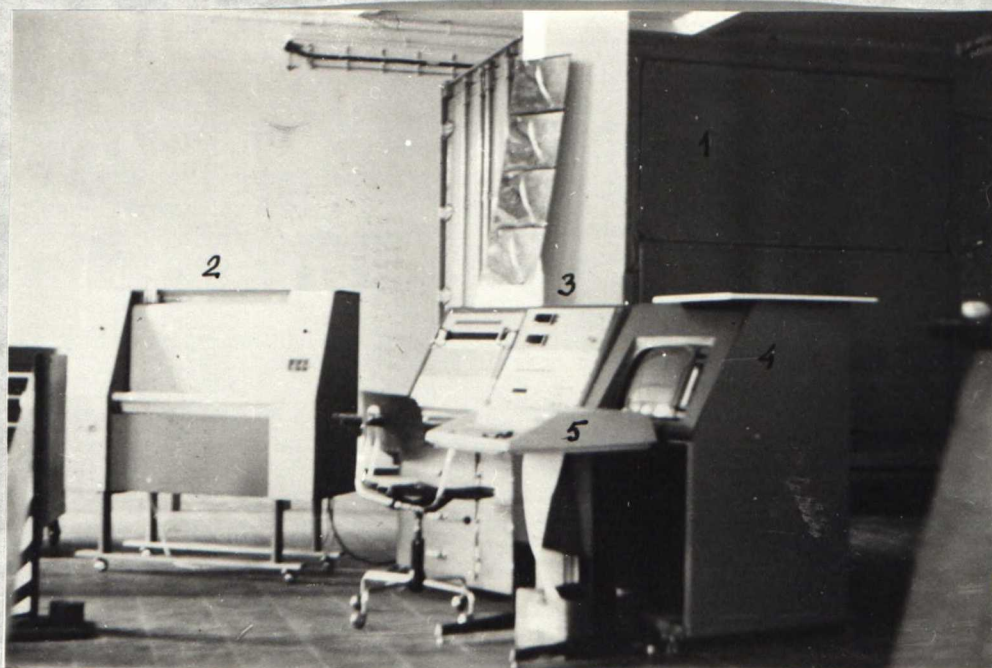
Tietokone laskee myös nk. indikaattorifunktion

$$F = \operatorname{im} \delta_j / \sqrt{\operatorname{im} \delta_j^2 + \operatorname{re} \delta_j^2} \quad (6.3)$$

jossa δ_j tarkoittaa siirtymää anturipisteessä j . Kun F on minimissään, kone värähtelee mahdollisimman lähellä ominaisvärähtelymuotoaan. Indikaattorifunktiolle on näyttö ohjauspöydässä. Pisteiksi, jotka otetaan summalausekseen 6.3, voidaan valita mielivaltaisesti enintään 80 mittauspistettä. Kiihtyvyyssan-

tureiden maksimimäärä on 250.

Koko järjestelmä on rakennettu sisältä äänieristettyyn umpinaiseen auton perävaunuun (kuva 6.8), jolloin se voidaan siirtää tutkittavan rakenteen luo.



Kuva 6.8 Tulostus- ja ohjauslaitteet: 1. liikkuva mittausvaunu, 2. piirturi, 3. ohjauspöytä, 4. kuvaputki, 5. kirjoitin.

Lähteen 18 mukaan yleisesti hyväksytty kriteeri sille, että moodi on viritetty koostuu allaolevista ehdoista:

1. On havaittavissa yksikköherätettä vastaava vastemaksimi eli "piikki".
2. Kunkin pisteen kiihtyvyydet ovat joko samassa vaiheessa keskenään tai niiden välillä on 180 asteen vaihesiirto, resonanssin aikana mitatut kiihtyvyydet rakenteen eri pisteissä ovat joko samassa tai eri vaiheessa referenssipisteeseen nähden, mutta ovat ± 90 asteen vaihesiirroissa voimaan nähden. Edellinen pätee, kun vaimennus on pieni.
3. Kun heräte lopetetaan äkillisesti, havaitaan yhdellä taajuudella värähtelevä, hitaasti vaimeneva värähtely.

Klassisen menetelmän suurin puute on se, että täristimien si-

joittelu ja säätäminen moodin virittämiseksi on etenkin korkeammilla taajuuksilla hyvin vaikeaa ja vaatii ennakkotietoa (esim. laskelmia) rakenteesta. Menetelmän vaatima laitteisto on hyvin kallis, täristimiä vahvistimineen tarvitaan ainakin neljä kappaletta ja kiihtyvyysantureita varten tarvitaan monikanavainen mittalaite. Ellei tulosten käsittelyyn ole käytettävissä edellä esitellyn kaltaista laitteistoa, se vie huomattomasti aikaa.

6.4 Siirtofunktion mittaus

Tässä digitaalisen signaalianalysoitsijan käyttöön perustuvasa menetelmässä rakennetta herätetään laajakaistaisella signaalilla (satunnaismelu tms.) ohjatulla täristimellä. Vaihtoehtoisesti voidaan herätteenä käyttää esim. vasaralla aikaansaatavaa impulssia (luku 5).

Rakenteen pisteeseen A kohdistettu herätevoima ja kiihtyvyyssanturilla pisteessä B mitattu vaste siepataan samanaikaisesti analyysoitsijain, signaalit Fourier-muunnetaan ja niiden osamäärä on pisteiden A ja B välinen siirtofunktio. Värähtelymuotojen selvillesaamiseksi on muodostettava useiden pisteiden väliset siirtofunktiot.

Käytännössä menetellään siten, että rakennetta herätetään täristimellä sopivasti valitusta pisteestä ja kiihtyvyyssanturin paikkaa muutellaan tai käytetään useita kiihtyvyyssantureita. Impulssitestauksen yhteydessä kiihtyvyyssanturin paikka on vakio ja herätettä annetaan useista pisteistä. Fysikaalisesti mielekkäät rakenteet omaavat Maxwellin lain nimellä tunnetun symmetriayhteyden: pisteessä A vaikuttavan voiman vaste pisteessä B on sama kuin pisteessä B vaikuttavan voiman vaste pisteessä A. Tästä seuraa, että N pisteen väliset vuorovaikutukset voidaan kuvata $N(N+1)/2$ siirtofunktiolla. Ilman symmetriaa tarvittaisiin N^2 yhteyttä.

Edellä esitettyjä järjestelyjä, joissa kiihtyvyyssanturin tai täristimen paikka on vakio, kutsutaan yhden pisteen menetelmiksi (single point method). Pistettä valittaessa tulee ottaa huomioon, ettei se ole jonkin moodin solmukohdassa tai lähellä

sitä. Jos näin on asia , ei ko. moodi näy mittauksissa. Yhdellä tärhistimen tai kiihtyvyysanturin asetuksella ei normaalisti saada kaikkia moodeja herätettyä, vaan asetuksia tarvitaan useita.

Siirtofunktiomittauksen huono puoli on sen heikohko erottelukyky, kun lähekkäin on useita moodeja tai kun moodit ovat voimakkaasti kytkeytyneet /19/. Vastaavia vaikeuksia ilmenee, jos rakenteessa on voimakkaita paikallisia moodeja, jotka kätkevät alleen tai häiritsevät globaalisten moodien mittausta.

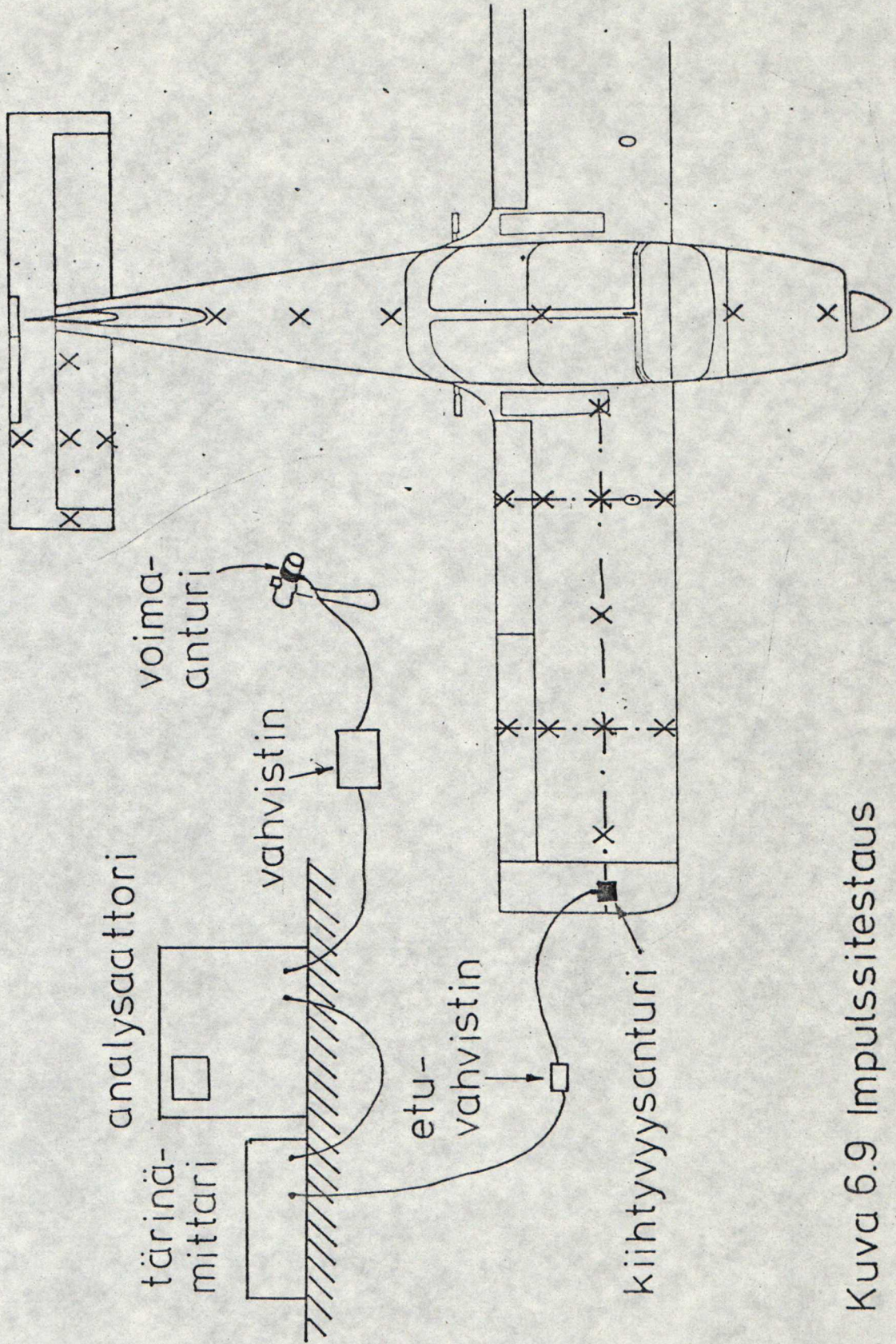
Impulssitestaukseen soveltuva laitteisto on esitelty kuvassa 6.9. Kiihtyvyysanturin signaali johdetaan tärinämittarin tai latausvahvistimen kautta toiselle analysaattorin kanavista. Haluttaessa voidaan signaali kuljettaa suodattimen kautta häiritsevien korkeiden taajuuksien eliminoimiseksi.

Voima-anturi on kiinnitetty vasaraan ja sen signaali johdetaan vahvistettuna toiselle kanavalle. Voima-anturi voidaan kiinnittää myös itse rakenteeseen, jolloin vasaran kiihtyvyydestä aiheutuva voima ei aiheuta virhettä mittaukseen.

Mittauspisteet merkitään esim. huopakynällä rakenteeseen. Siiven ja vakaimien taivutusmuotoja määritettäessä anturi kiinnitetään ko. kantopinnan kärkeen, arvioituun vääntökeskiöön. Vasaralla isketään vääntökeskiössä tai salon kohdalla sijaitseviin mittauspisteisiin. Vääntöä mitattaessa anturi sijoitetaan kantopinnan etu- tai jättöreunaan ja isketään janteen suunnassa sijaitseviin mittauspisteisiin. Ohjainpintoja mitattaessa anturi kiinnitetään ohjainpintaan ja isketään kantopinnan takareunaan lähelle ko. ohjainpintaa.

Kiihtyvyys- ja voima-anturin vahvistukset säädetään oskilloskoopin avulla sopiviksi. Myöskin liipaisu voidaan säätää vain kokeilemalla.

Vasaralla aikaansaadun impulssin muotoa tarkkaillaan analysaattorin kuvaputkelta. Jos impulssi on heikko tai on tapahtunut kaksoiskosketus, jätetään kyseinen mittaus pois keskiarvosta.



Kuva 6.9 Impulssitestaus

Otosten lukumäärä, joista keskiarvo muodostetaan, riippuu rakenteen yksinkertaisuudesta ja mittaajan taidosta. Mittauksen hyvyttä tarkkaillaan koherenssifunktion ja värähtelyn kuvaajan avulla. Silloin, kun keskiarvojen lisääminen ei enää merkittävästi muuta kuvaajaa, voidaan lopettaa mittaus. Esimerkiksi purjelentokoneen siipeä mitattaessa saadaan viiden iskun keskiarvolla käyttökelpoisia tuloksia.

Täristimen käyttö mahdollistaa useampien keskiarvojen muodostamisen lyhyessä ajassa. Lentokoneen maavärähtelykokeisiin soveltuva laitteisto on esitetty kuvassa 6.10. Erona kuvaan 6.9 on se, että vasara on korvattu täristimellä. Voima-anturi on kiinnitetty täristimen työntötankoon ja täristintä ohjataan analysaattorin melukanavalta. Ohjaus voidaan suorittaa myös erilliseltä siniaaltogeneraattorilta tms.

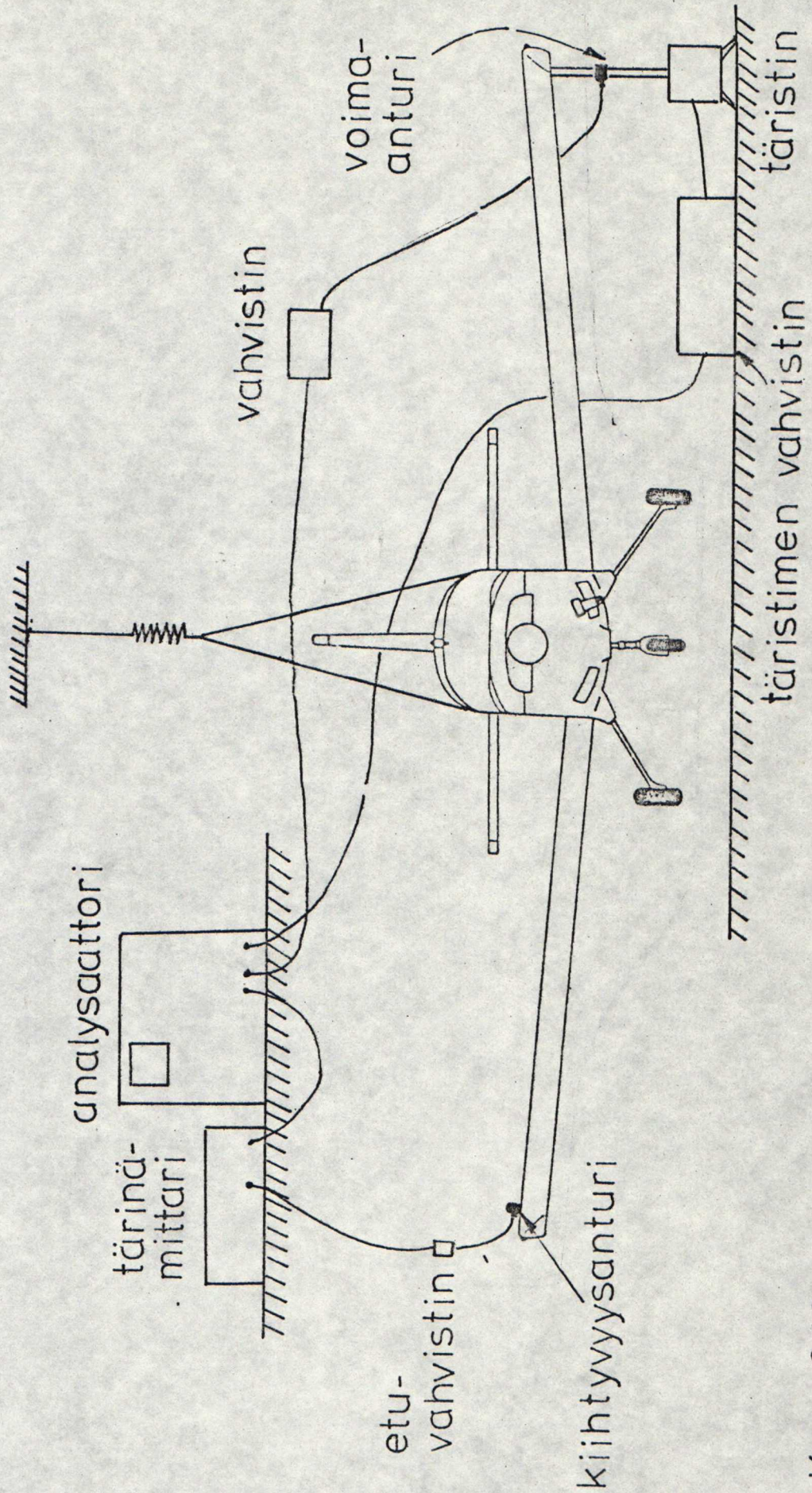
Täristinasennuksessa on otettava huomioon, ettei työntötanko muodostu tukipisteeksi rakenteelle - tällöin värähtely vääristyy. Jos kone on ripustettu kumisandumien varaan, nämä viruvat ajan mukana ja niiden kireys on aika ajoin tarkastettava.

Ominaistaajuudet luetaan kuvaputkelta (tai piirturin piirtämästä kuvasta) suuruus- tai imaginääripiikkien kohdalta. HP 5420A -analysaattorista saadaan piikkiä vastaava ominaistajuus ja vaimennus PEAK -käskyllä. Vaimennus voidaan laskea myös kohdan 2.6 menetelmillä.

Kun kaikki N pistettä mitataan samoilla vahvistimien asetuksilla, ovat siirtymät kussakin pisteessä suoraan verrannollisia tästä pisteestä mitatun imaginääripiikin korkeuteen. Muotoja piirrettäessä ne normalisoidaan asettamalla kunkin moodin suurimman piikin arvo ykköseksi ja jakamalla muut piikit sen arvolla.

6.5 Yleistettyjen massojen määrittäminen

Yhtälössä 6.1 esiintyvän yleistettyjen massojen matriisin alkiot määritetään maavärähtelykokeiden avulla. Fysikaalisesti yleistetty massa kuvaa sitä energiaa, mikä kussakin moodissa on liikkeessä, ts. kukin moodi voidaan kuvata yksinkertaisella



Kuva 6.10 Täristintestaus

jousi - massa mallilla, jolla on tietty yleistetty massa ja jäykkyys.

Yleistettyjen massojen määrittämiseksi koneen pinnalle kiinnitetään pieniä lisämassoja Δm . Lisämassat sijoitetaan lähelle tutkittavan moodin maksimiampplitudia. Purjelentokoneiden yhteydessä käytetään siivessä, rungossa ja vakaimissa 0.2 - 0.5 kg painavia massoja ja ohjainpinnoissa 0.02 - 0.1 kg /20/. Massoja on tavallisesti 1 - 4 kpl.

Kunkin moodin yleistetty massa lasketaan kaavalla:

$$M_{rr} = \frac{f_r}{2\Delta f_r} \sum_{k=1}^n \Delta m(P_k) u_r^2(P_k) \quad (6.4)$$

jossa /11/ f_r on ominaistaajuus, Δf_r on ominaistaajuuden muutos lisämassojen Δm vaikutuksesta ja u_r on siirtymä lisämassan sijaintipaikassa P_k . Oletus on, etteivät lisämassat muuta taipumamuotoa.

Mittauksen täytyy olla hyvin tarkkoja, sillä taajuuden muutos on usein vain sadasosahertsien luokkaa. Mikäli tähän tarkkuuteen ei pystytä, voidaan yleistetyt massat määrittää tunnetun massajakautuman ja ominaisvärähtelymuotojen avulla:

$$M_n = \sum_{m=1}^M M_m (u_{m,n})^2 \quad (6.5)$$

jossa M_m on rakenne-elementin m massa ja $u_{m,n}$ siirtymä moodilla n .

7. PIK-20E :N MAAVÄRÄHTELYKOKKEET

Edellä esitellyn signaalianalyssaattorin käyttöön perustuvan menetelmän soveltuvuutta kokeiltiin suorittamalla apumoottorilla varustetun purjelentokoneen PIK-20E maavärähtelykokeet. Saksan Liittotasavallan ilmailuviranomaiset vaativat ko. kokeiden suorittamista tyyppihyväksyntäänsä varten. Koneen fluterittomuuden on näiden koetulosten perusteella analysoinut DI N.Niedbal DFVLR:n Göttingenin tutkimuslaitoksesta /21/.

7.1 Koneen esittely

PIK-20E on lujitemuovinen sisäänkelattavalla apumoottorilla varustettu purjelentokone. Siiven ja pyrstön rakennemateriaali on lasikuitu/epoksi - rakenteinen kerroslevy, jonka ydinaineena on PVC -vaahto. Siipisalon paarteet ovat hiilikuitua, runko on lasikuitu/epoksi -kuorirakennetta jäykistettynä kaudella kaarella ja ohjaamon kohdalta hiilikuituteipillä.

Mitat:

Siiven kärkiväli	15.0 m
Siipipinta-ala	10.0 m ²
Pituus	6.5 m
Korkeus	1.5 m

Painot:

Tyhjämassa	n. 300 kg
Suurin lentomassa	470 kg
Vesipainolasti	120 kg
Siipikuormitus	36 - 47 kp/m ²

Voimalaite:

Sisäänkelattava 2-tahtinen Rotax 503

Teho 31.6 kW (43 hv)/ 6200 rpm

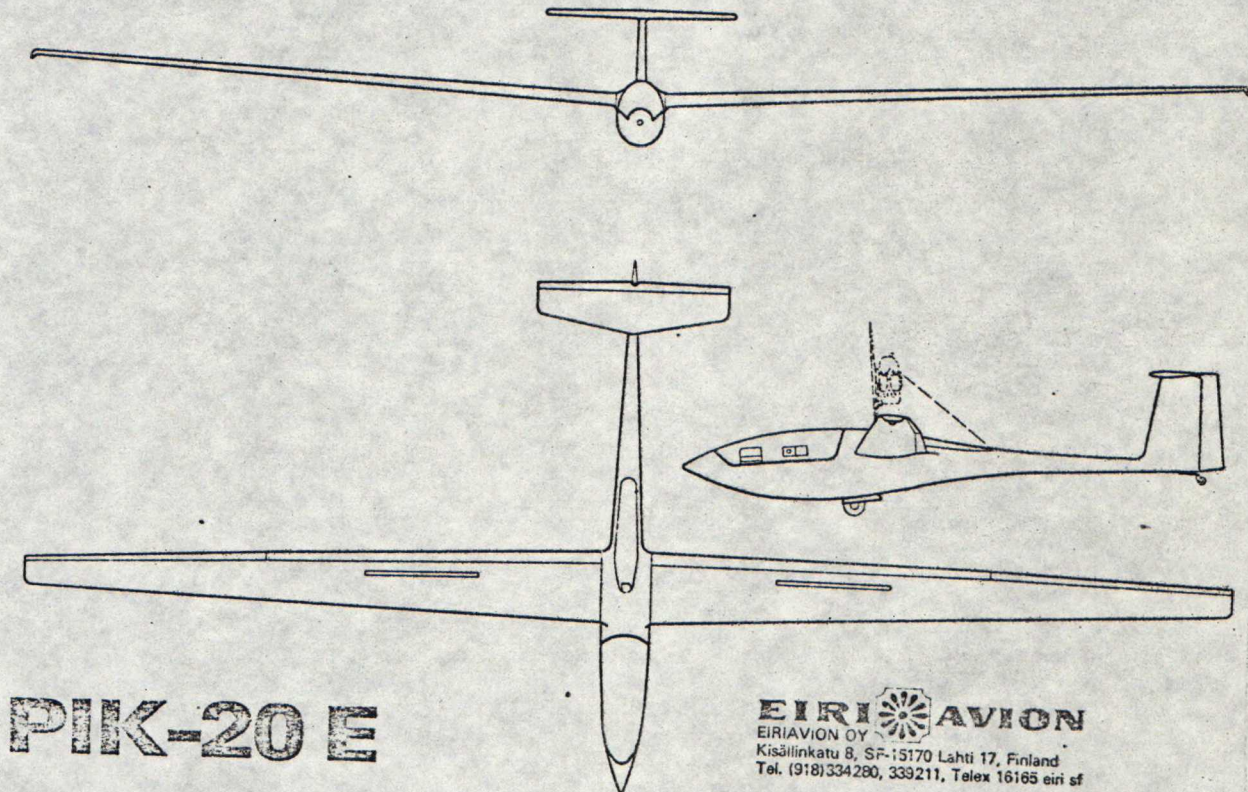
Saavutusarvot:

Paras liitoluku	40
Paras kohoamisnopeus	4.0 m/s
Matkanopeus	135 km/t

Nopeusrajoitukset:

Suurin sallittu nopeus V_{NE}	285 km/t
Suurin sallittu nopeus puuskaisella säällä	220 km/t
Suurin nopeus moottori ulkona	195 km/t

Kokeissa käytetty kone oli sarjanumero 20 - 215, tunnukseltaan OH-593.



Kuva 7.1 Yleiskuva koneesta

7.2 Mittausjärjestelyt

Mittauksia varten kone ripustettiin painopisteestään kumisandumien varaan riippumaan. Koneen massa kokeen aikana oli 410 kg. Vesipainoa ei käytetty, polttoainetta oli 15 l ja ohjaajan massaa vastaava määrä painolastia oli sijoitettu ohjaamoon.

Koneen suurinta lentomassaa 470 kg vastaavat värähtelymuodot ja ominaistaajuudet voidaan haluttaessa laskea nyt mitattujen arvojen perusteella. Samoin voidaan vesipainolastin vaikutus ottaa huomioon laskennollisesti. Värähtelymuotoihin eivät normaalit lentomassan vaihtelut juurikaan vaikuta, ominaistaajuudet alenevat hieman massan kasvaessa, kts. esim. /16/.

Kumisandumien yhteenlaskettu jousivakio oli 9000 N/m, joten ripustuksen ominaistaajuus oli:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{9000}{410}} = 4.7 \text{ rad/s} = 0.75 \text{ Hz}$$

Koneen alin ominaistaajuus on 2.8 Hz, joten ripustus täyttää ehdon, että sen ominaistaajuus on enintään 1/3 alimmasta ominaistaajuudesta.

Ohjainpintojen ominaistaajuuksia mitattaessa sauva oli vapaana, päärakenteita mitattaessa se oli löysästi tuettu ohjaamossa oleviin painoihin.

Kokeet suoritettiin käyttäen sekä kuvan 6.9 mukaista impulssitestauksia että kuvan 6.10 mukaista täristinasennusta. Impulssitestauksen tarkoituksena oli määrittää ominaistaajuudet ja joitakin värähtelymuotoja alustavasti ja vertailua varten. Siipeen merkittiin 9 mittauspistettä tasavälein, runkoon 7 ja sivuvakaimeen 5. Korkeusvakainta sekä ohjainpintoja ei tässä yhteydessä mitattu.

Vasaran ja kiihtyvyysanturin vahvistukset säädettiin oskilloskoopin avulla n. 4 V:n suuruisiksi, sillä analysaattorin sisääntulosignaali saa olla korkeintaan 10 V. Vasaran pää oli kovaa muovia, pehmeämpi kuminen pää olisi ilmeisesti herättänyt

alempia taajuuksia paremmin. Mittaus suoritettiin normaalisti viiden iskun keskiarvolla, joskin runkoon ja sivuvakaimen jouduttiin usein lyömään 10 - 20 kertaa iskujen välisen hajonnan ollessa suuri.

Kiihtyvyyssanturi kiinnitettiin kierteellä peltilevyyn, joka kiinnitettiin koneeseen lujalla kangasteipillä. Siiven taivutusta tutkittaessa anturi sijoitettiin siiven kärkeen puoliväliin jännettä, runkoa tutkittaessa sivuvakaimen tyven eteen ja sivuvakainta tutkittaessa sen yläosaan puoliväliin jännettä.

Iskun aikaansaama värähtely vaimeni varsin nopeasti, mikä on ominaista muovirakenteelle. Tämä aiheutti sen, että halutun resoluution ja mittausajan välillä jouduttiin tekemään kompromisseja. Koko kiinnostava taajuusalue voitiin tutkia käyttämällä 100 Hz kaistanleveyttä. Tätä vastaava resoluutio 0.39 Hz on karkeahko, mutta se todettiin riittäväksi rakenteen pääkomponenttien ominaistajuuksia ja värähtelymuotoja määrittäessä. Mittaustilaksi SETUP STATE ohjelmoitiin näinollen:

Measurement: Transfer function

Average: 5 Stable

Signal: Impact

Trigger: Internal CHNL 1

Center frequency: 0 Hz

Bandwidth: 100 Hz

Siirtofunktiota mitattiin siis viiden iskun keskiarvolla. Signaalityypiksi määriteltiin Impact. Tästä oli se etu, että kunkin iskun jälkeen voitiin tarkastaa impulssin muoto kuvaputkelta ja esim. kaksoiskosketuksen tapahtuessa hylätä ko. mittaus keskiarvosta. Jos signaalityypiksi olisi määritelty Transient, olisi analysaattori toiminut muuten samoin, mutta tätä hylkäysmahdollisuutta ei olisi ollut. Liipaisu tapahtui sisäisesti kanaavalta 1 (voima), keskitaajuus oli 0 Hz ja kaistanleveys 100 Hz.

Täristimen avulla suoritetuissa mittauksissa koneen pinnalle teipattiin kuvassa 7.6 (s.75) esitettyihin mittauspisteisiin peltilevyt, joihin kiihtyvyysanturi kiinnitettiin magneettijalustansa avulla. Ohjainpintoja mitattaessa anturi oli ohjainpinnan jättöreunassa. Rungon vääntöä ja siiven sekä korkeuskaimen sivutaivutusta mitattaessa anturi kiinnitettiin kulma-profiiliin palaan, joka teipattiin koneeseen kiinni.

Siiven värähtelyjen herättämiseksi täristimen työntötanko kiinnitettiin siivenkärkeen; kärkipyörä irroitettiin ja tangon pää kiinnitettiin nivelellä sen akselille. Rungon sivu- ja pystytaivutusta herätettäessä työntötanko kiinnitettiin kannuspyörän akselin päähän, edellisessä tapauksessa vaaka- ja jälkimmäisessä pystysuoraan. Näiden asetusten lisäksi olisi ollut aiheellista sijoittaa täristin lähelle kutakin ohjainpintaa, mutta tätä ei ajanpuutteen vuoksi ehditty tehdä.

Täristimen vahvistinta ohjattiin analysaattorin melukanavalta, josta tuli valitulle kaistanleveydelle keskittynyttä satunnaismelua. Voima- ja kiihtyvyysanturin vahvistus säädettiin muutamaa voltin suuruiseksi. Mittaustilaksi ohjelmoitiin:

Measurement: Transfer function

Average: 20 Stable

Signal: Random

Trigger: Internal CHNL 1

Center frequency: 0 Hz

Bandwith: 50 Hz

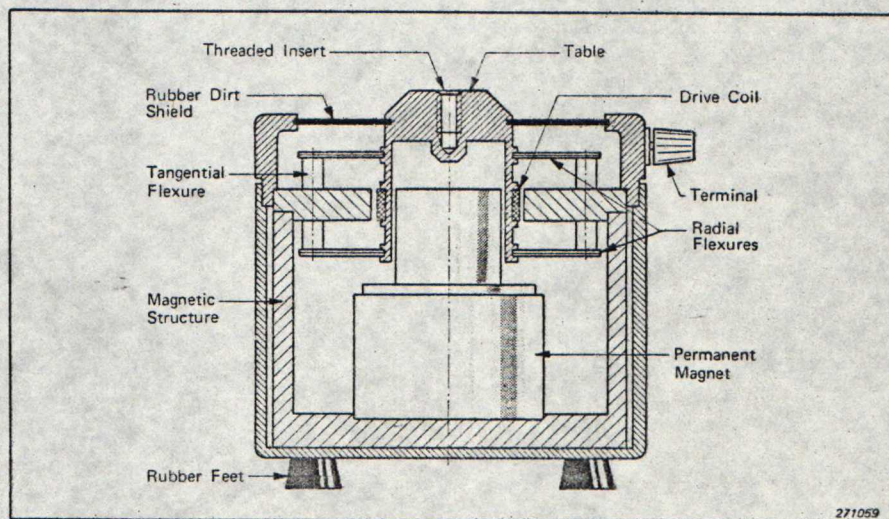
Kahdenkymmenen mittauksen keskiarvolla koherenssi oli hyvä, ilmeisesti kymmenenkin olisi riittänyt. Luvun 6 perusteella ylin tutkittava taajuus on purjekoneelle n. 45 Hz, joten 50 Hz:n kaistanleveydellä saatiin tutkittua koko alue.

Mittaukset (n.140 kpl) nauhoitettiin kasetille myöhempää analysointia varten. Vasaratestauksen yhteydessä tuloksia ei nauhoitettu vaan ne otettiin kuvaputkelta ylös saman tien. Mittaustunteja kertyi kaikkiaan n. 40.

7.3 Mittauslaitteet

Täristin

Täristimenä käytettiin sähködynaamista Bruel & Kjaer Type 4809:ää. Alunperin oli tarkoitus käyttää voimakkaampaa Type 4808:aa, jollainen on tilattu lujuusopin laboratorioon. Mittausajankohtana se ei ollut kuitenkaan vielä käytettävissä.



Kuva 7.2

B & K

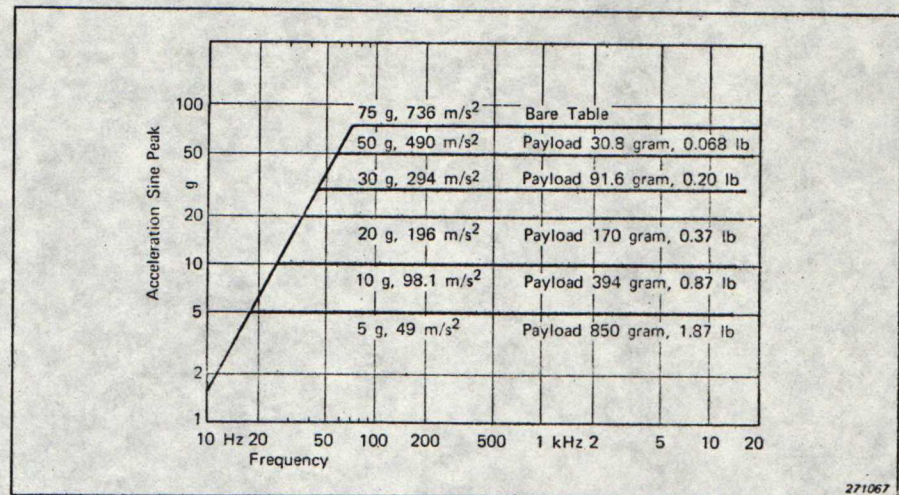
4809

Täristimen edestakainen liike aikaansaadaan kelan vaihtovirran ja kelaan leikkaavan magneettikentän vuorovaikutuksena. Kestomagneetilla aikaansaadaan täristimen runkoon magneettivuo ja ilmarakoon suuri magneettivuon tiheys. Ajokela on ilmarakon magneettivuossa ja se on kiinnitetty työntötankoon. Syöttämällä ajokelaan vaihtovirtaa siihen indusoituu sähködynaaminen voima, joka on verrannollinen indusoituvan sähkövirran voimakkuuteen. Täristimen liikkeen taajuus ja amplitudi riippuvat ajokelalle syötettävän virran taajuudesta ja jännitteestä.

Kuvassa 7.3 on Type 4809:n kuormitusrajat taajuuden funktiona, kun vahvistimena on B & K Type 2706 tehovahvistin. Yläpuolella 70 Hz taajuuden rajoituksen asettaa käytettävissä oleva voima (työntötankoon kohdistuva voima). Kuitenkin tiettyä kiihtyvyyttä vastaava siirtymä kasvaa taajuuden pienetessä. Tästä syystä liike on alemmilla taajuuksilla rajoitettu 8 mm suuruisiksi, jottei se osuisi rajoittimiin saakka.

Sinimuotoista herätettä annettaessa (klassisen menetelmän yhteydessä) Type 4809 ei sovellu alimpien moodien virittämiseen,

koska sen alarajataajuus on 10 Hz.



Kuva 7.3 Sinimuotoisen herätteen suorituskyvykäyrät

Tekniset tiedot:	Suurin voima (sinihuippu)	45 N
	Taajuusalue	10 Hz - 20 kHz
	Resonanssitaajuus	20 kHz
	Suurin kiihtyvyys	75 g
	Suurin liike	8 mm
	Suurin nopeus	1.65 m/s
	Suurin sisääntulovirta	5 A RMS
	Impedanssi	2 /500 Hz
	Massa	8.3 kg

Täristimen vahvistimena käytettiin B & K Type 2706:a, joka on suunniteltu ohjaamaan täristintä 4809. Vahvistimen virranrajoitus on 5 tai 1.8 A. Vahvistuksen säätö jatkuvasti tai 10 dB portain, maksimivahvistus 40 dB. Lähtöteho 75 VA 3 ohmin kuormaan. Taajuusalue 10 Hz - 20 kHz.

Tärinämittari

Kiihtyvyysanturin signaalit vahvistettiin esivahvistimessa, jonka jälkeen ne syötettiin Oy Wärtsilä Ab:n valmistamaan WIB-72 kuusikanavaiseen tärinämittariin. Mittauksissa käytettiin koko ajan samaa kanavaa (kanava 1). Sopiva vahvistus

ja alarajataajuus oli valittavissa portaittaisesti.

Tekniset tiedot:	Alarajataajuus 0.2 Hz (valittavissa)
	Ylärajataajuus 700 Hz - 3 kHz
	Ulostuloimpedanssi Alle 10 ohmia
	Ulostulojännite -1V - +1V
	Signaali/kohina suhde 5 dB
	Massa 4.3 kg

Laitteen tarkkuus kiihtyvyydelle on 2%, nopeudelle 5% ja siirtymälle 10%, kun mitattavan värinän taajuus on suurempi kuin 1.2 x alarajataajuus. Kun taajuus on suurempi kuin 10 x alarajataajuus on tarkkuus nopeudelle 3% ja siirtymälle 4%. Kiihtyvyyden maksimiampplitudi on 60 g, nopeuden 5 m/s ja siirtymän 2.5 m.

Kiihtyvyysanturi

Anturi oli General Radio Companyn valmistama malli 1560 - P54, sarja 957.

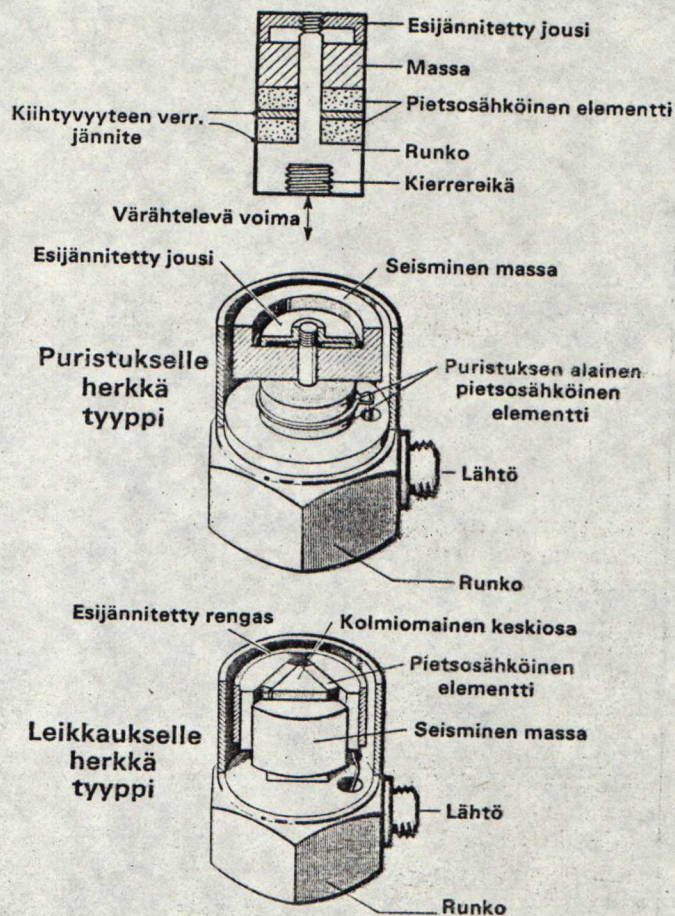
Tekniset tiedot:	Herkkyys 782 mV/g johtimen kanssa
	Kapasitanssi 936 pF
	Massa 150 g kiinnitysalustan kanssa

Pietsosähköisten kiihtyvyysantureiden toiminta perustuu muutamien materiaalien (esim. bariumtitaniitti BaTiO_3) kykyyn synnyttää sähkövirtaa niiden joutuessa mekaanisen rasituksen alaisiksi. Kuvasta 7.4 käy esille pietsosähköisen kiihtyvyysanturin rakenne. Yleisimmin käytetään puristukselle herkkää tyyppiä, jossa massa puristaa pietsosähköistä elementtiä ja synnyttää tähän jännitettä. Uudemmissa leikkaukselle herkissä tyypeissä massat aiheuttavat pietsosähköiseen elementtiin leikkausta.

Lentokoneen maavärähtelykokeet eivät aseta kovin suuria vaa-

Kuva 7.4 /22/

Pietsosähköisen kiihtyvyysanturin rakenne



timuksia kiihtyvyysanturille. Anturin lineaarinen taajuusalue rajoittuu alapäästä pääasiassa kahdesta syystä: esivahvistimen alarajataajuudesta ja anturin herkkyystyypistä ympäristön lämpötilan vaihteluille. Ensin mainittu ei yleensä ole ongelma, koska raja voidaan säätää alle yhden herzin. Lämpötilaherkkyys on nykyisillä anturityypeillä saatu myös alle herzin suuruiseksi.

Ylärajataajuus määräytyy anturin oman jousimassasysteemin mukaan ja siihen vaikuttaa myös anturin kiinnitys. Ylärajataajuus on joka tapauksessa kiloherzien suuruusluokkaa ja näin korkeita taajuuksia ei lentokoneesta mitata.

Voima-anturi

Voima-anturin tyyppi oli KIAG SWISS Type 903A ja sen yhteydessä käytettiin latausvahvistinta KIAG SWISS Type 5001. Toimintaperiaatteeltaan voima-anturi on samanlainen pietsosähköinen elementti kuin kiihtyvyysanturikin.

Liitteessä 2 on valokuvia mittausjärjestelyistä.

7.4 Mittaustulokset

Vasaratestauksella sekä täristimen avulla mitatut eri moodien ominaistaajuudet on koottu taulukkoon 7-1. Taulukosta käyvät ilmi myös joidenkin moodien lasketut ominaistaajuudet ja vertailun vuoksi lähteen 16 arvot PIK-20A:lle.

Lasketut arvot on saatu käyttämällä lähteen 23 tietokoneohjelmia SIIPIT, VAANTO ja RUNKOT. Massa- ja jäykkyysjakautumat laskuja varten on koottu PIK-20E:n lujuuslaskuista /24/, jakautumat ja tietokoneajot on koottu liitteeseen 3.

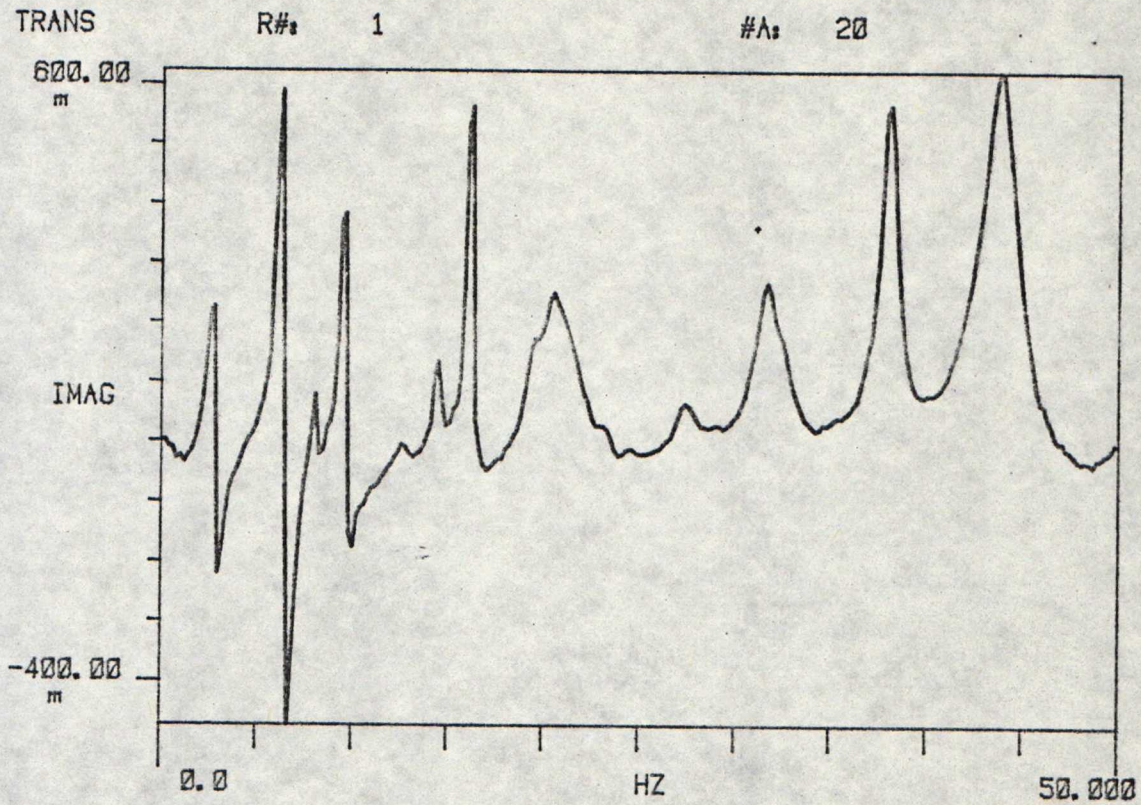
Kuvassa 7.5 on tyypilliset mittaustulokset. Ne esittävät siirtofunktion imaginääriosaa, kun täristin on ollut siiven kärjessä ja kiihtyvyysanturi kuvan 7.6 mittauspisteissä 1. Ylemmässä kuvassa anturi oli etu- ja alemmassa jättöreunassa. Siiven alimmat ominaistaajuudet ja muutamia rungon taajuuksia on nähtävissä selvinä piikkeinä. Alle 10 herzin ominaistaajuudet ovat heijastuneet peilikuviksi origon ylä- ja alapuolelle. Tämä johtuu ilmeisesti työntötangon pään ja rakenteen välisestä vällyksestä tai siitä, että täristimen alarajataajuus on 10 Hz. Liitteessä 4 on tyypillisiä mittaustuloksia ja niiden eri esitysmuotoja.

Eri värähtelymoodien siirtymämuodot on esitetty kuvissa 7.7 - 7.19. Kuvissa musta väri tarkoittaa siirtymää paperin tasossa kohtisuoraan alaspäin ja raidallinen alue ylöspäin. Kuviin 7.20 - 7.23 on piirretty siiven alimpien taivutusmoodien sekä rungon ja vakaimien alimpien moodien värähtelymuodot tarkemmin. Kuvissa näkyvät myös lasketut ja vasaratestatut muodot.

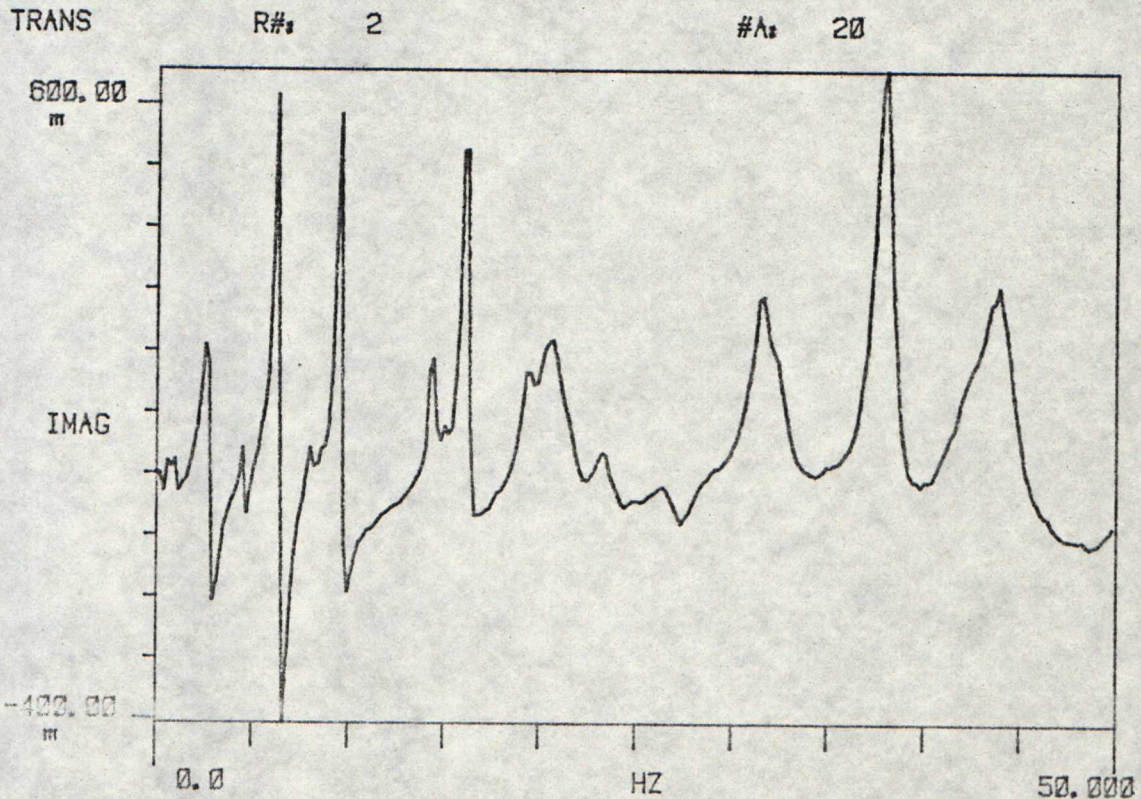
Tulosten analysointi mittausten kestäessä ei ollut ajanpuutteen vuoksi mahdollista. Jälkeenpäin kävi ilmi, että käytetty resoluutio ei riittänyt yleistettyjen massojen määrittämiseen mittaamalla. Tätä kokeiltiin 0.36 ja 0.5 kg painavien lisämassojen avulla. Karkeahko resoluutio tekee myös vaimennuksen määrittäminen melko likimääräiseksi ja sitä ei ole tästä syystä suoritettu tässä yhteydessä.

Taulukko 7 - 1 Mittaustulokset

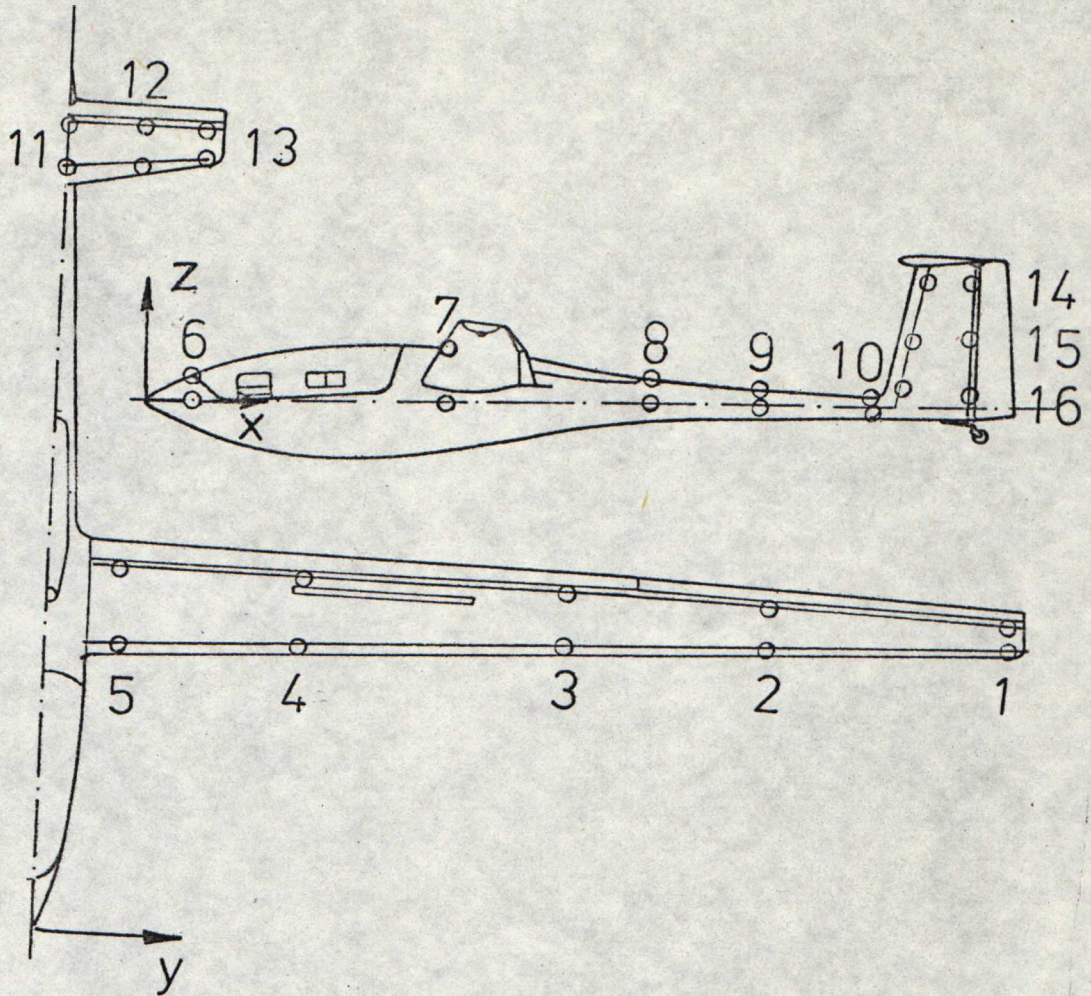
Moodi	Ominais- taajuus	Laskettu	PIK-20A
	Hz	Hz	Hz
1. Siiven I symm. taivutus	2.8	2.7	3.1
2. Siiven I epäs. taivutus	6.4	5.6	5.9
3. Siiven II symm. taivutus	9.5	9.8	8.6
4. Siiven II epäs. taivutus	16.0	15.4	16.0
5. Siiven III symm. taivutus	23.3	23.4	
6. Siiven III epäs. taivutus	31.7	30.3	
7. Siiven I symm. vääntö	27.4	23.1	27.6
8. Rungon I pystytaivutus	7.7	6.8	9.8
9. Rungon I sivutaivutus	8.1		7.5
10. Rungon I vääntö	19.2		19.2
11. Korkeusvakaimen I s. taivutus	15.6		21.2
12. Sivuvakaimen I taivutus	4.8		4.4
13. Siivekkeen rotaatio	42		41.8
14. Laskusiivekkeen rotaatio	44		44.0
15. Korkeusperäsimen rotaatio	38		38.0
16. Sivuperäsimen rotaatio	8		9.5
Vasaralla testattuja arvoja: 1 = 2.9 Hz, 2 = 6.2 Hz, 3 = 9.7 Hz, 4 = 16.0 Hz, 5 = 23.7 Hz, 6 = 31.7 Hz, 7 = 27.1 Hz, 9 = 8.7 Hz, 10 = 19.2 Hz, 12 = 4.8 Hz			



Kuva 7.5 Siirtofunktion imaginääriosan kuvaaja siiven kärjestä mitattuna. Yläkuvassa anturi oli etu-

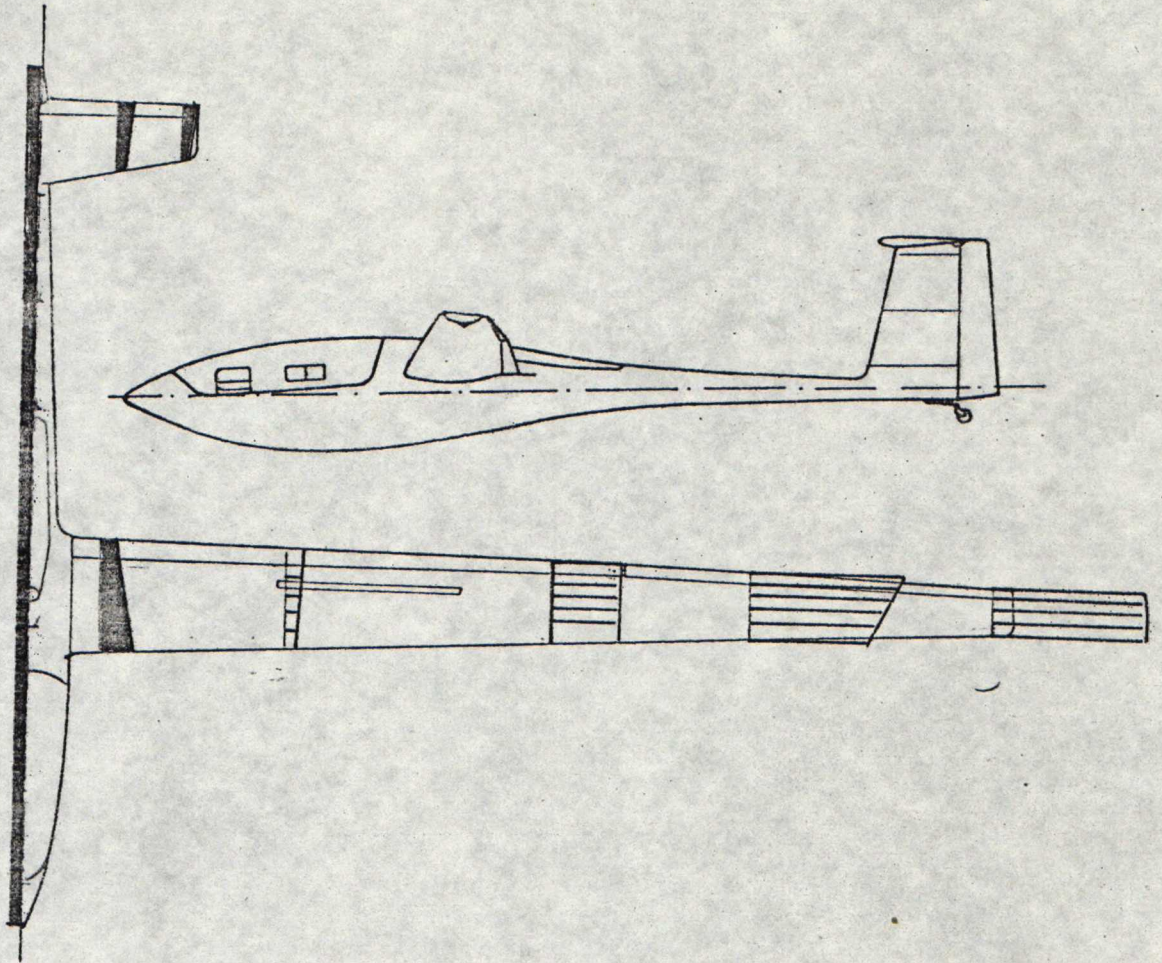


reunassa ja alakuvassa jättöreunassa.



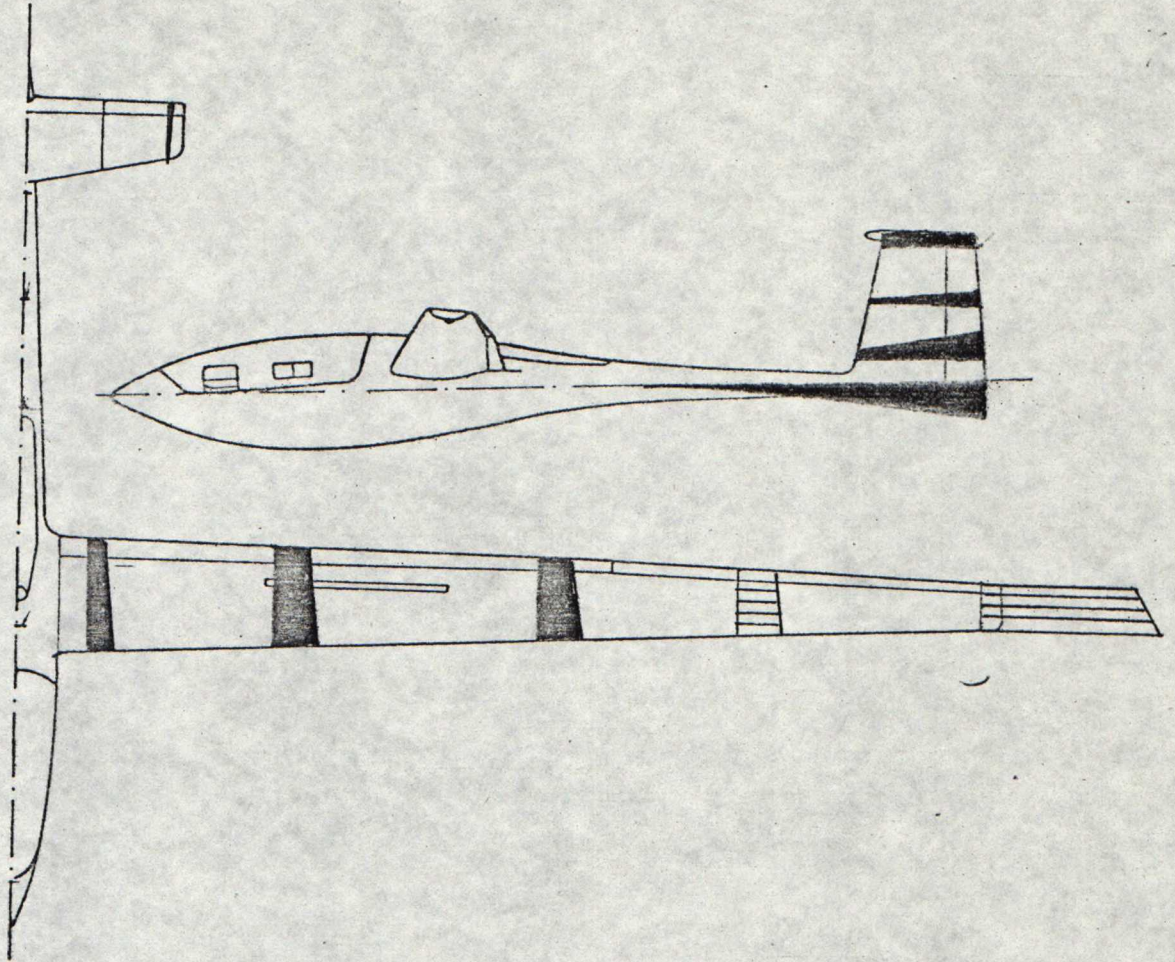
Kuva 7.6 Mittauspisteiden koordinaatit

$y_1 = 7.35 \text{ m}$, $y_2 = 5.75 \text{ m}$, $y_3 = 4.00 \text{ m}$, $y_4 = 1.55 \text{ m}$, $y_5 = 0.50 \text{ m}$
 $x_6 = 0.35 \text{ m}$, $x_7 = 2.35 \text{ m}$, $x_8 = 3.85 \text{ m}$, $x_9 = 4.70 \text{ m}$, $x_{10} = 5.60 \text{ m}$
 $x_{11} = 0.0 \text{ m}$, $x_{12} = 0.56 \text{ m}$, $x_{13} = 1.10 \text{ m}$
 $z_{14} = 1.00 \text{ m}$, $z_{15} = 0.60 \text{ m}$, $z_{16} = 0.30 \text{ m}$



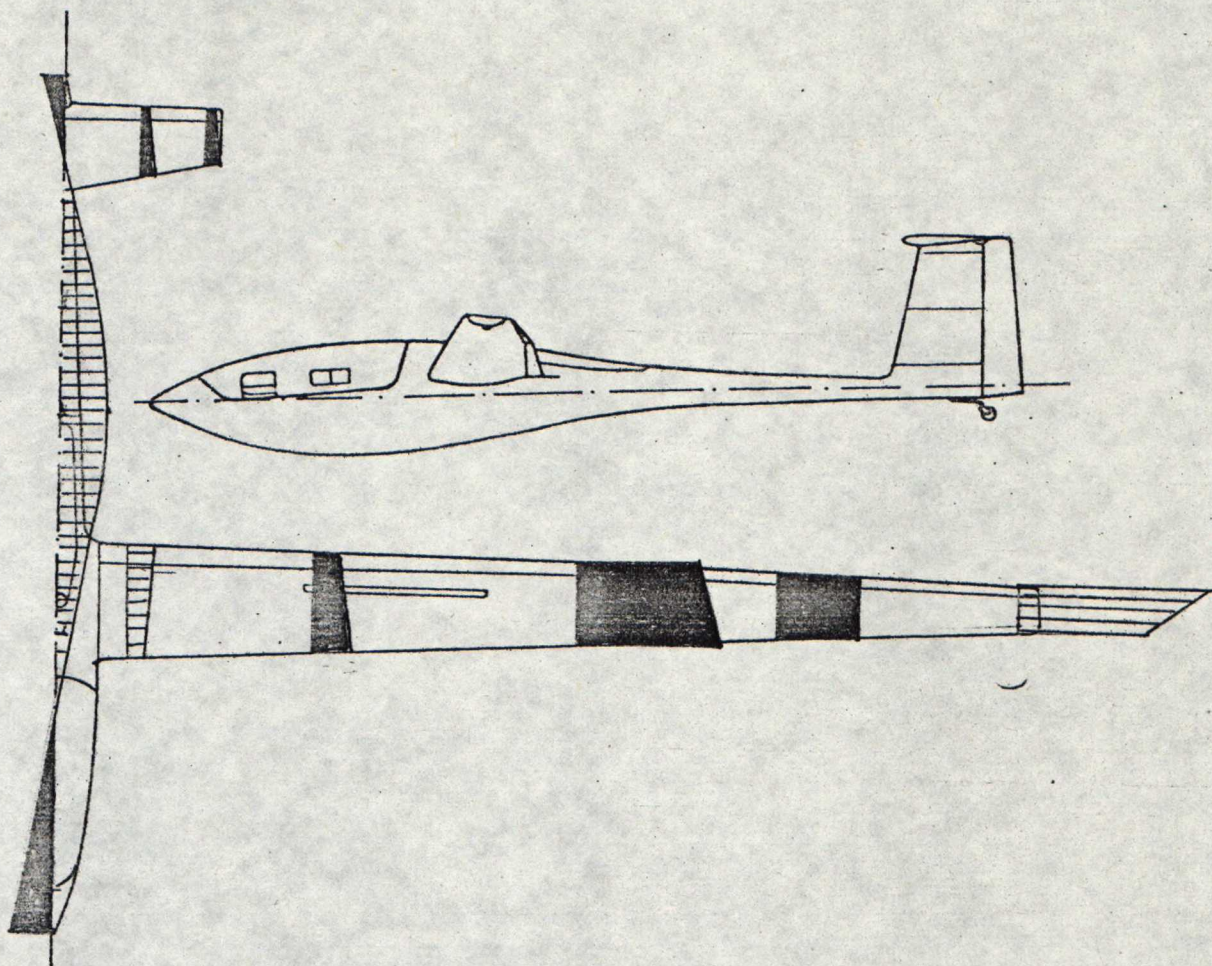
Kuva 7.7 Siiven I symmetrinen taivutus, $f = 2.8 \text{ Hz}$

Vibraattori oli siiven kärjessä. Taivutusmuoto on varsin puhdas, runko ja vakaimet värähtelevät lähes jäykkinä. Siivessä on havaittavissa pientä vääntymää verrattuna lähteessä 16 esitettyyn PIK-20A:n värähtelyyn. PIK-20E:ssä onkin siiven lujitekankaita vähennetty.



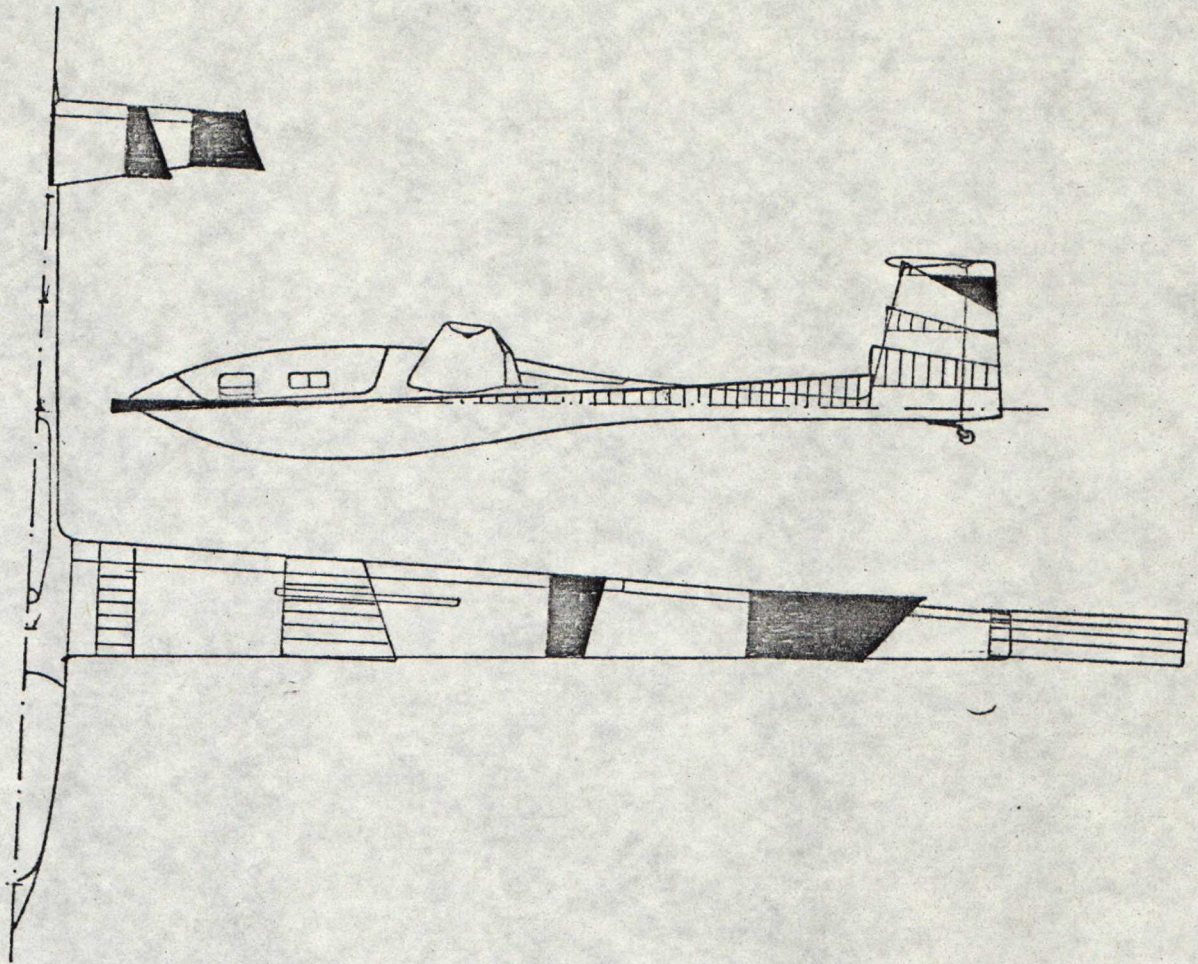
Kuva 7.8 Siiven I antisymmetrinen taivutus, $f = 6.4 \text{ Hz}$

Vibraattori oli siiven kärjessä. Siiven taipuma on varsin puhdas, runko ja korkeusvakain eivät värähtelee pystysuunnassa. Runko taipuu sivulle likipitään ensimmäistä sivutaivutustaan ja sivuvakain liikkuu sen mukana melko jäykkänä. Kuvasta puuttuu rungon vääntö, joka unohtui mittauksesta.



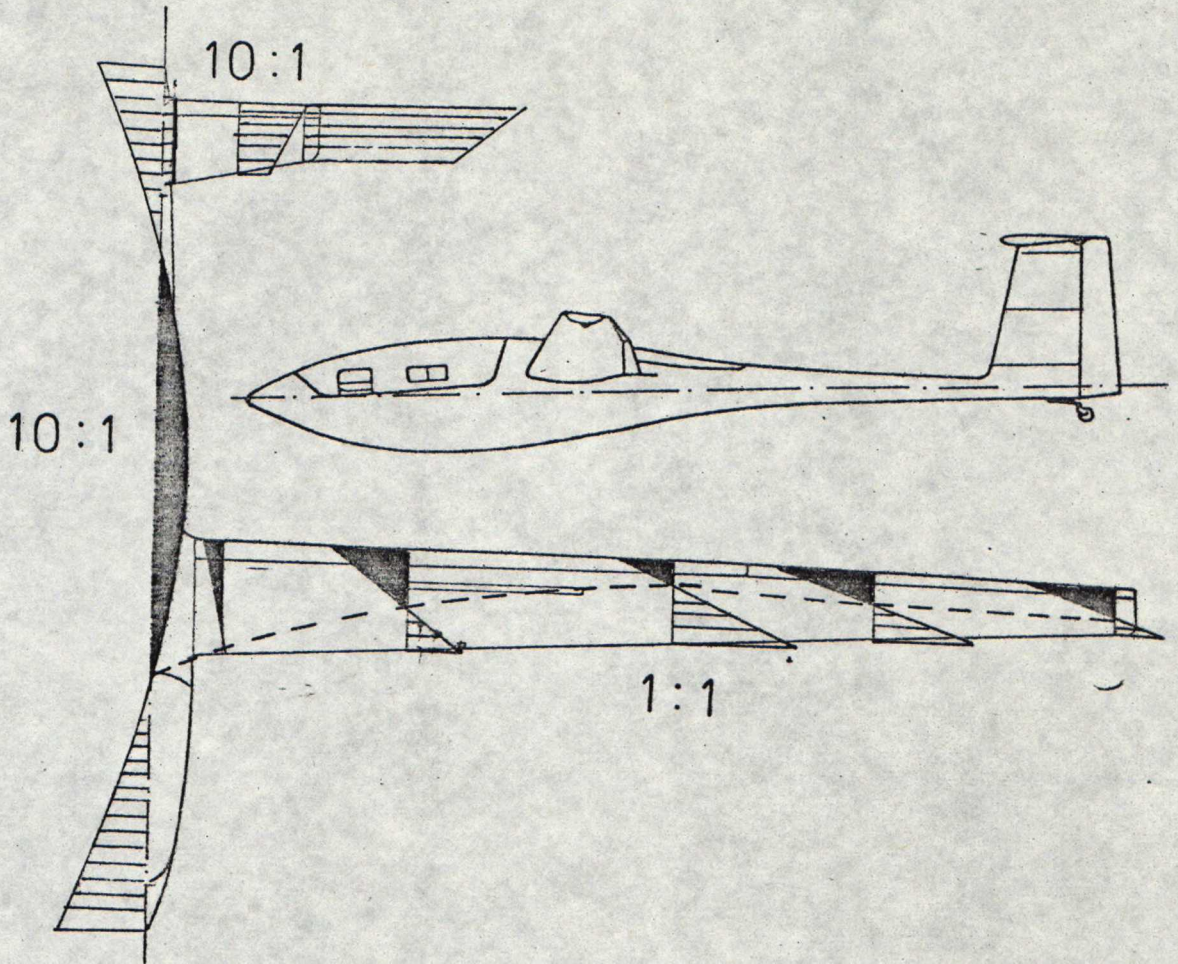
Kuva 7.9 Siiven II symmetrinen taivutus, $f = 9.5 \text{ Hz}$

Vibraattori oli siiven kärjessä. Siiven taivutuksen seassa on jonkin verran vääntöä. Korkeusvakain värähtelee lähes jäykkänä ja runko taipuu likipitään ensimmäistä pystytai-
vutusmoodiaan.



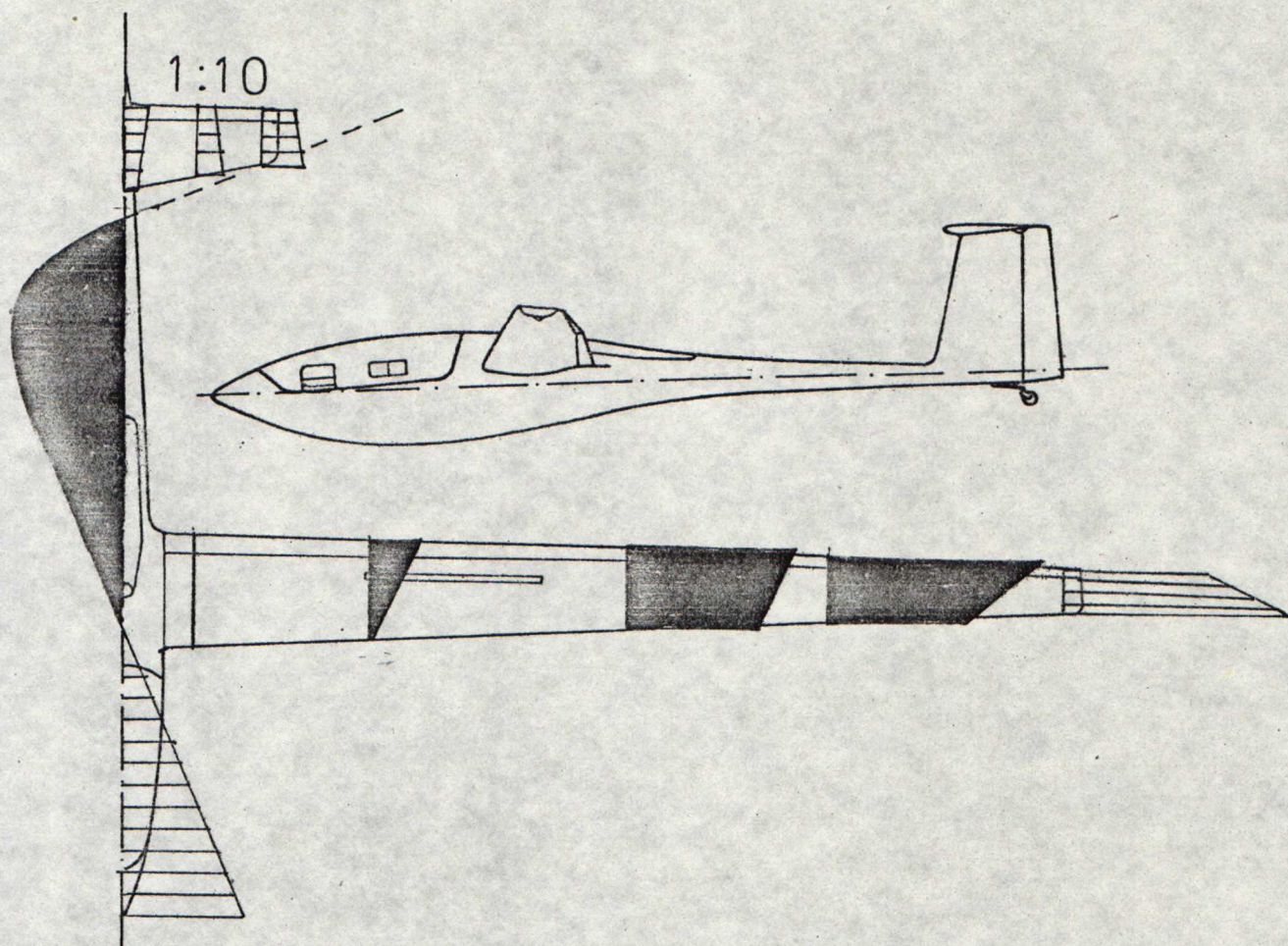
Kuva 7.10 Siiven II antisymmetrinen taivutus, $f = 16.0 \text{ Hz}$

Vibraattori oli siiven kärjessä. Runko taipuu ensimmäistä sivutaivutusmoodiaan, sivuvakain suorittaa vääntövärähtelyä ja korkeusvakain värähtelee ensimmäistä symmetristä taivutustaan.



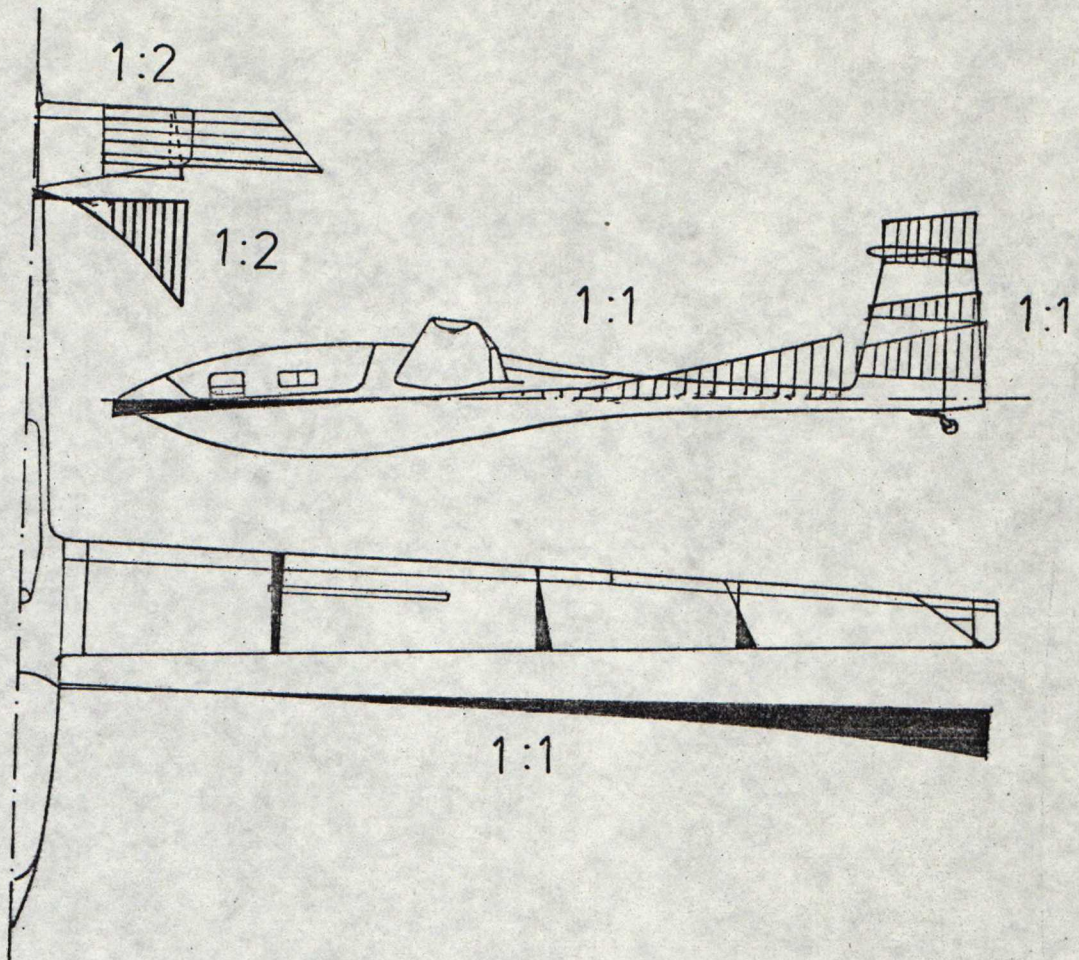
Kuva 7.11 Siiven I vääntö, $f = 27.4 \text{ Hz}$

Vibraattori oli siiven kärjessä. Värähtelymuoto on varsin puhdas. Runko värähteli pystytaivutusta ja korkeusvakain symmetristä taivutusta.



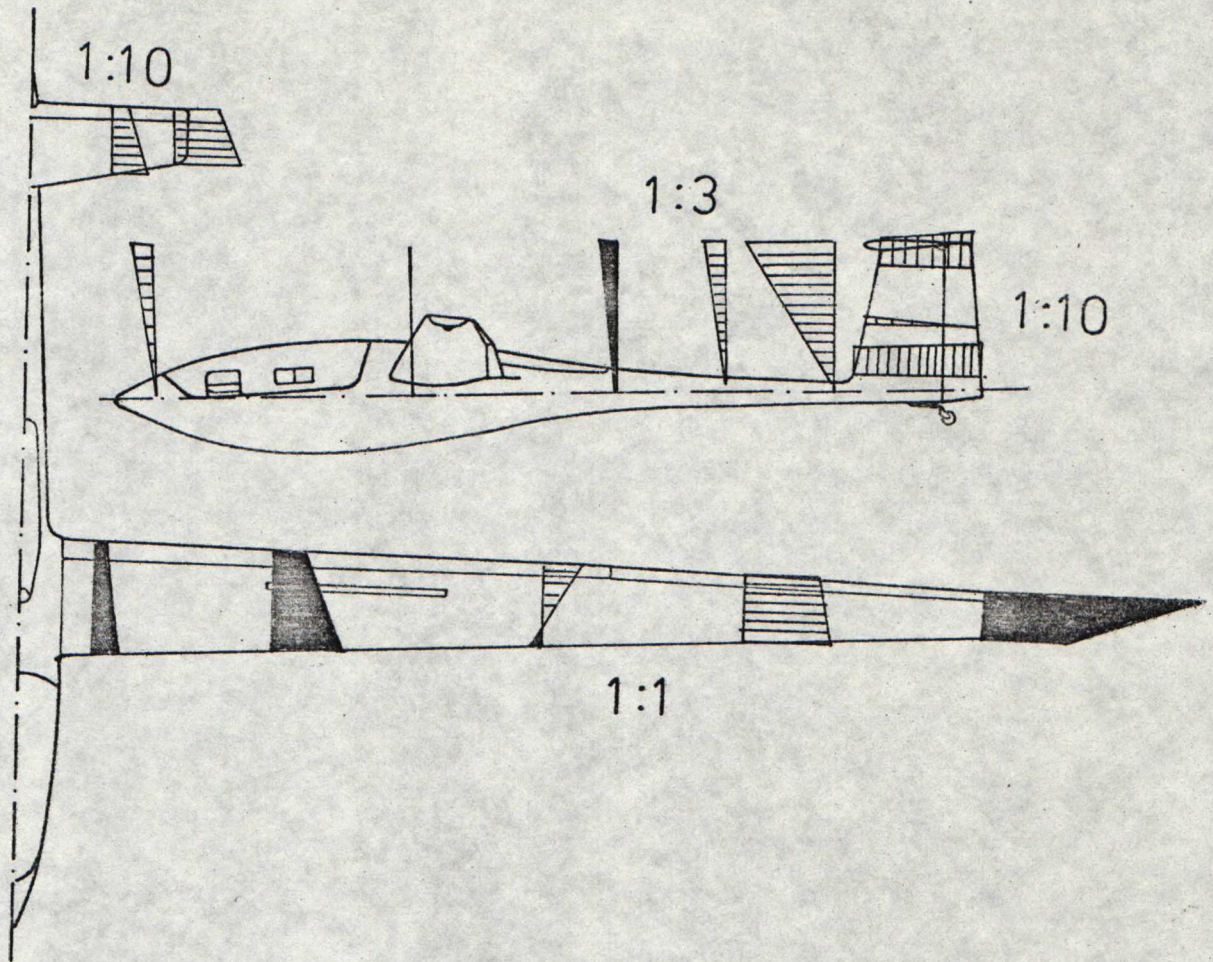
Kuva 7.12 Rungon I pystytaivutus, $f = 7.7 \text{ Hz}$

Vibraattori oli kannuspyörässä. Rungon taipumamuodosta näkyy takarungossa sijaitsevan 50 kg painavan voimalaitteen vaikutus selvästi. Korkeusvakain liikkui lähes jäykkänä ja siipi värähteli hyvin epäpuhdasta toista symmetristä taivutustaan.



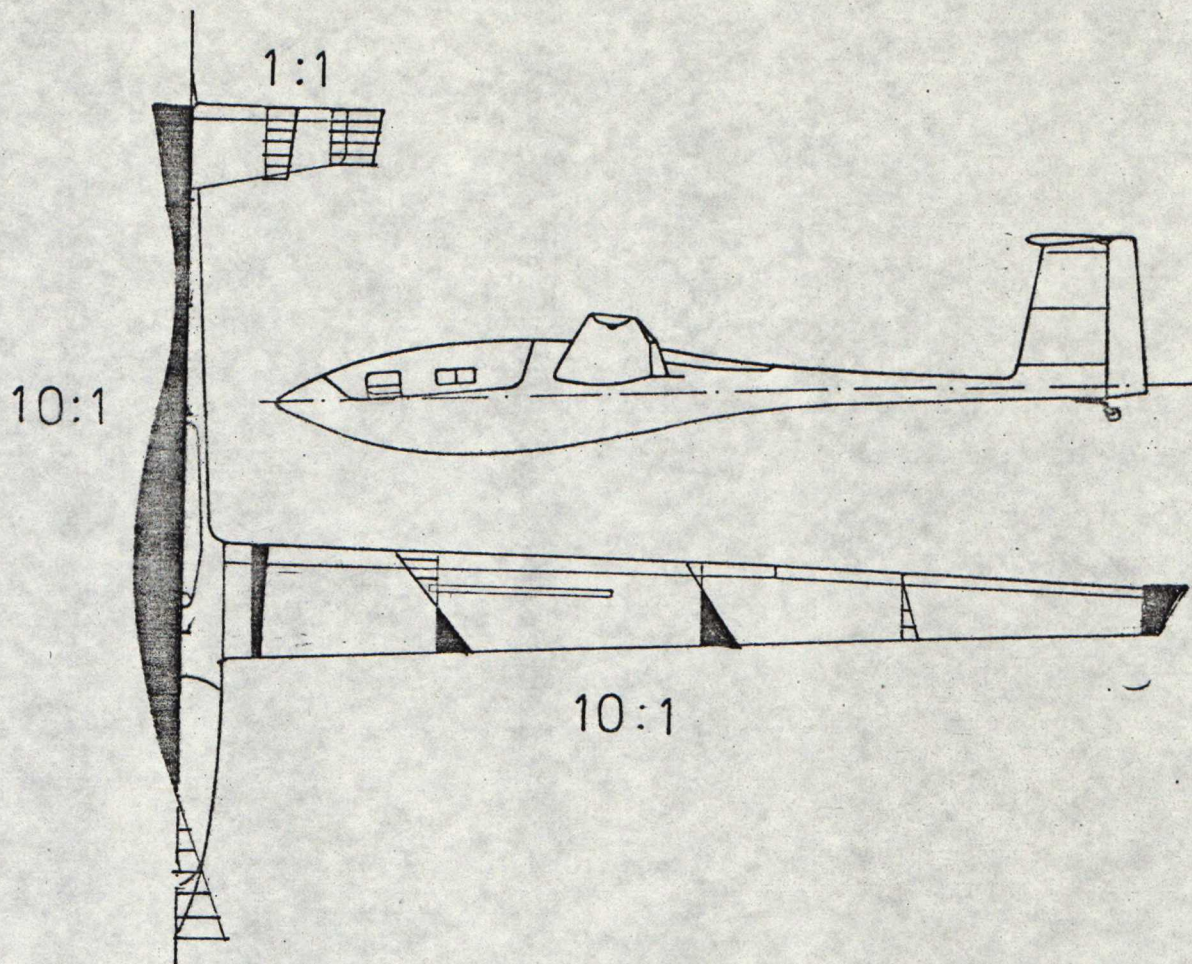
Kuva 7.13 Rungon I sivutaivutus, $f = 8.1 \text{ Hz}$

Vibraattori oli kannuspyörässä. Siipi värähtelee epäpuhdasta väännön ja taivutuksen sekaista värähtelyä.



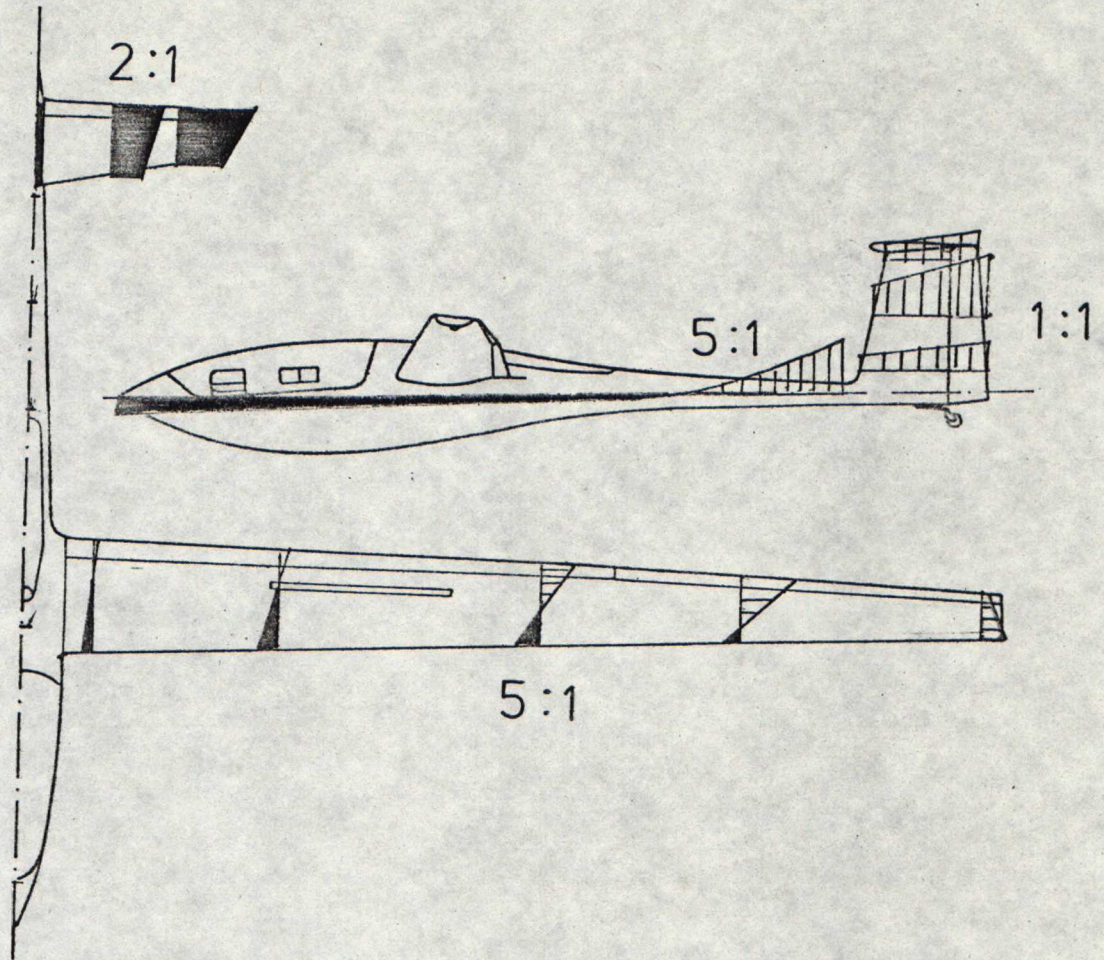
Kuva 7.14 Rungon vääntöväärähtely, $f = 19.2 \text{ Hz}$

Vibraattori oli kannuspyörässä. Siipi värähtelee epäpuhdasta toista antisymmetristä taivutusta. Korkeusvakain värähtelee epäsymmetrisesti.



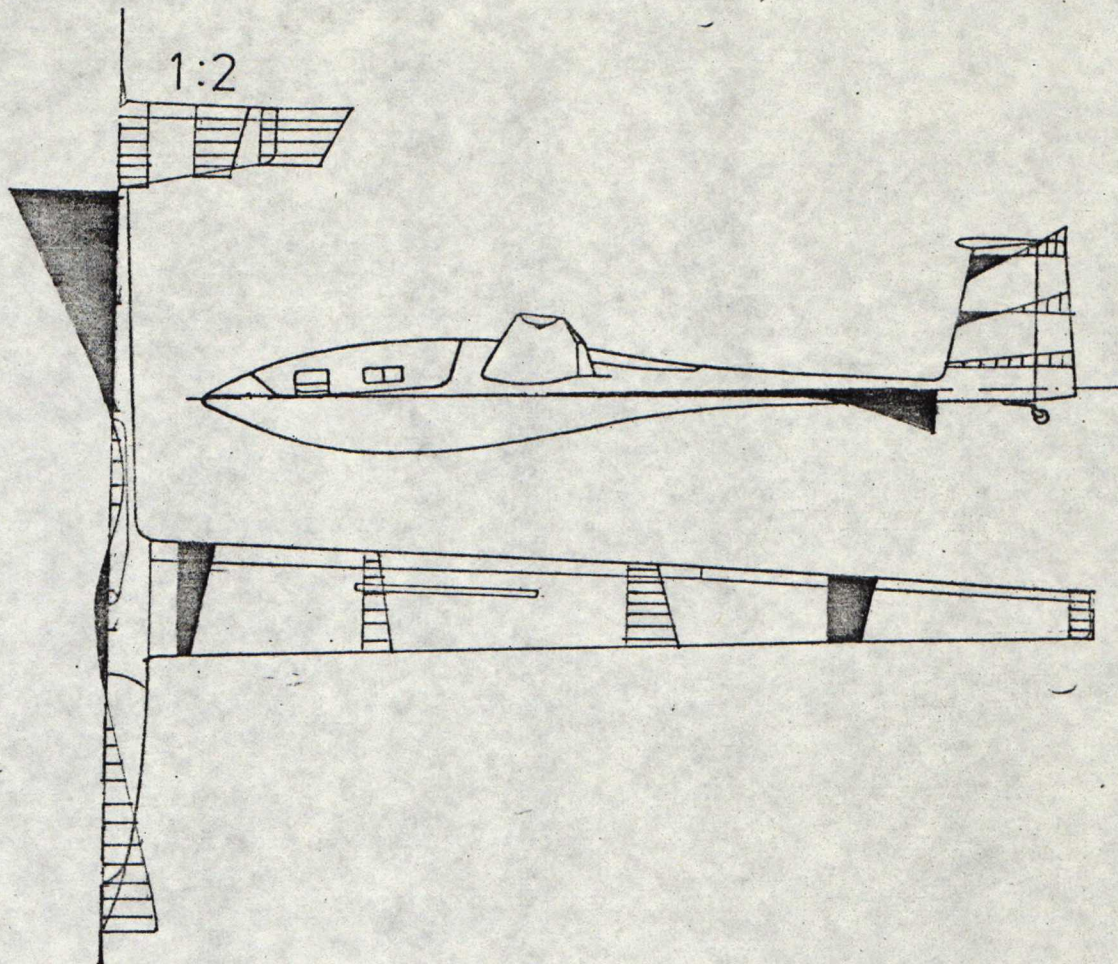
Kuva 7.15 Korkeusvakaimen symmetrinen taivutus, $f = 15.6 \text{ Hz}$

Runko värähtelee toista pystytaivutusmoodia, siiven liike on hyvin epämääräinen. Vibraattori oli kannuspyörässä.



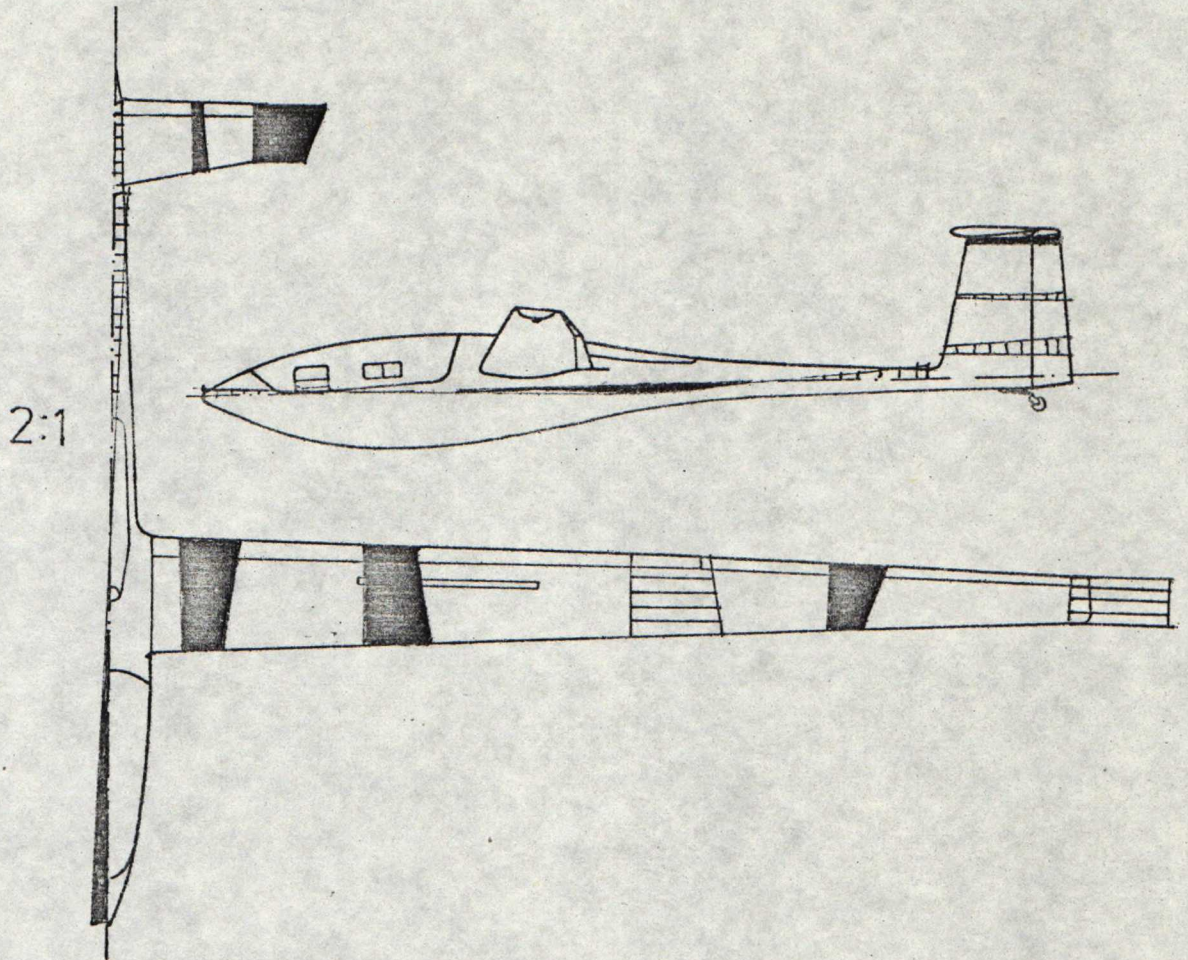
Kuva 7.16 Sivuvakaimen ensimmäinen taivutus, $f = 4.8 \text{ Hz}$

Vibraattori oli kannuspyörässä. Runko värähtelee ensimmäistä sivutaivutusta ja siipi vääntyy erikoisesti. Korkeusvakain värähtelee epäsymmetristä taivutusta.



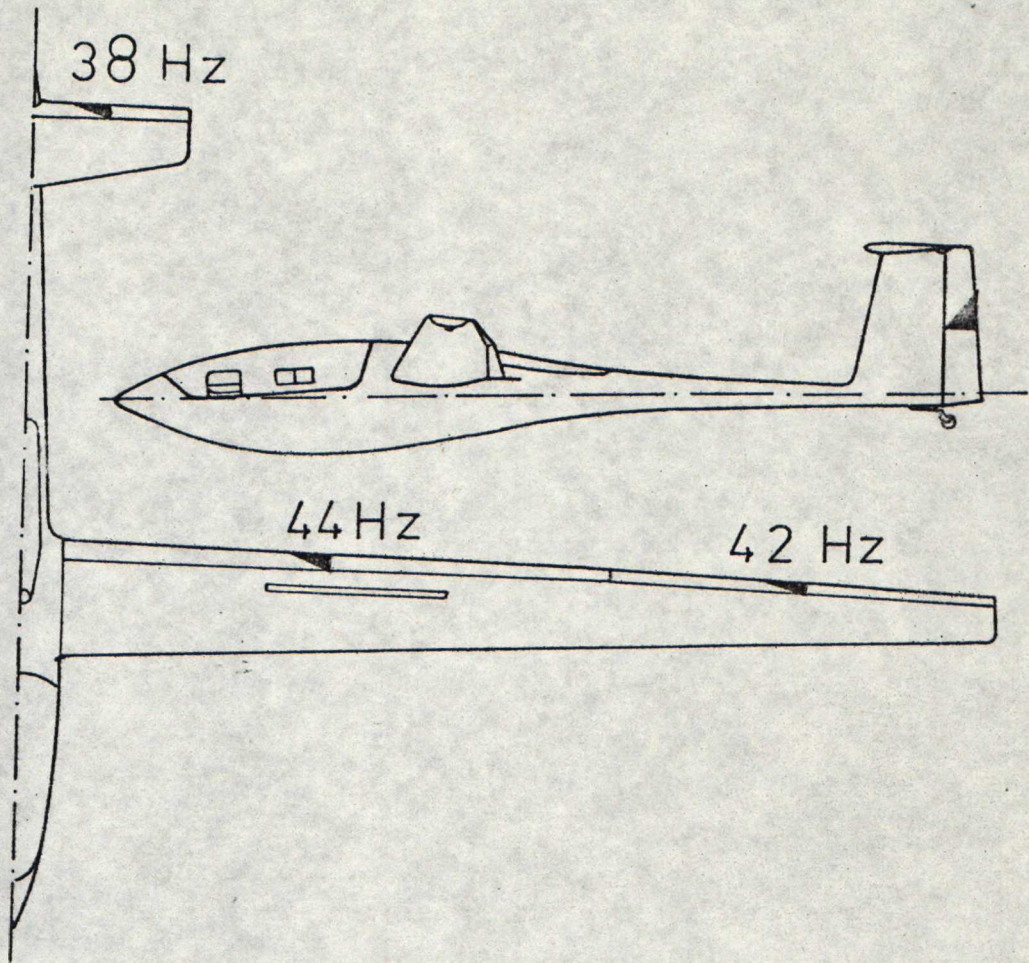
Kuva 7.17 Moodi 23.3 Hz

Tämä moodi esiintyi hyvin voimakkaana kaikilla vibraattorin asetuksilla. Siiven värähtelyn puolesta se on kolmas symmetrinen taivutus, mutta rungon sivuttaistaivutus on myös voimakasta. Rungon pystytaivutusmuoto on keskirungon kohdalla ilmeisen virheellinen. Moottori rungon sisällä on ehkä vaikuttanut asiaan.



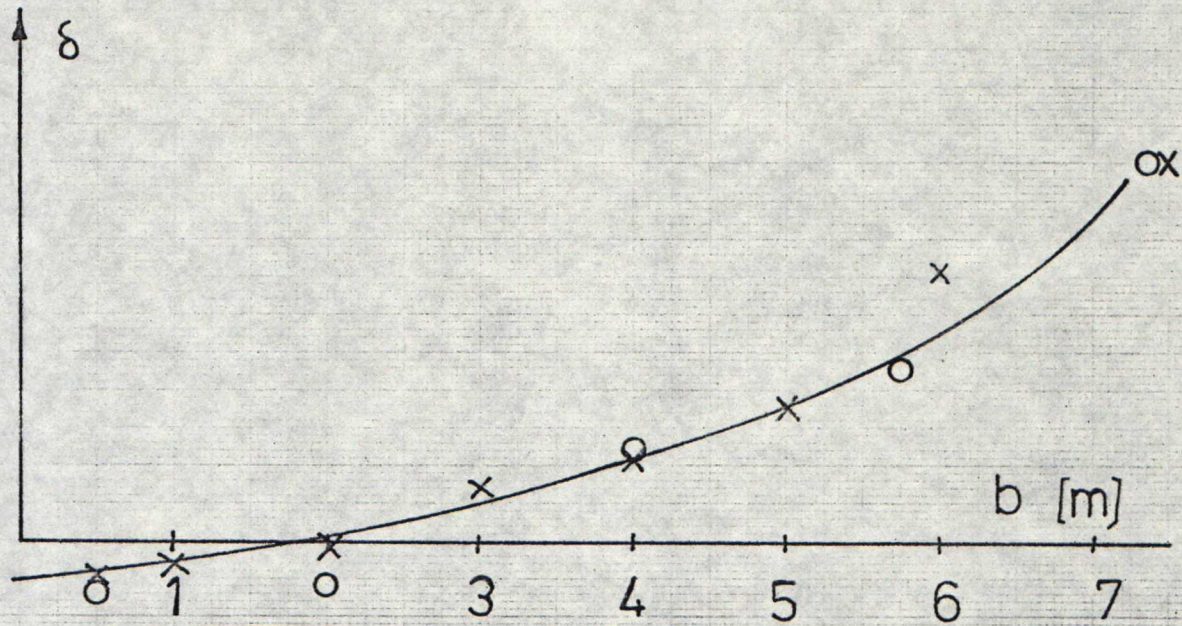
Kuva 7.18 Siiven III epäsymmetrinen taivutus, $f = 31.7$ Hz

Vibraattori oli siiven kärjessä. Siiven taivutusmuoto on hyvin puhdas, runko liikkuu olemattoman vähän.



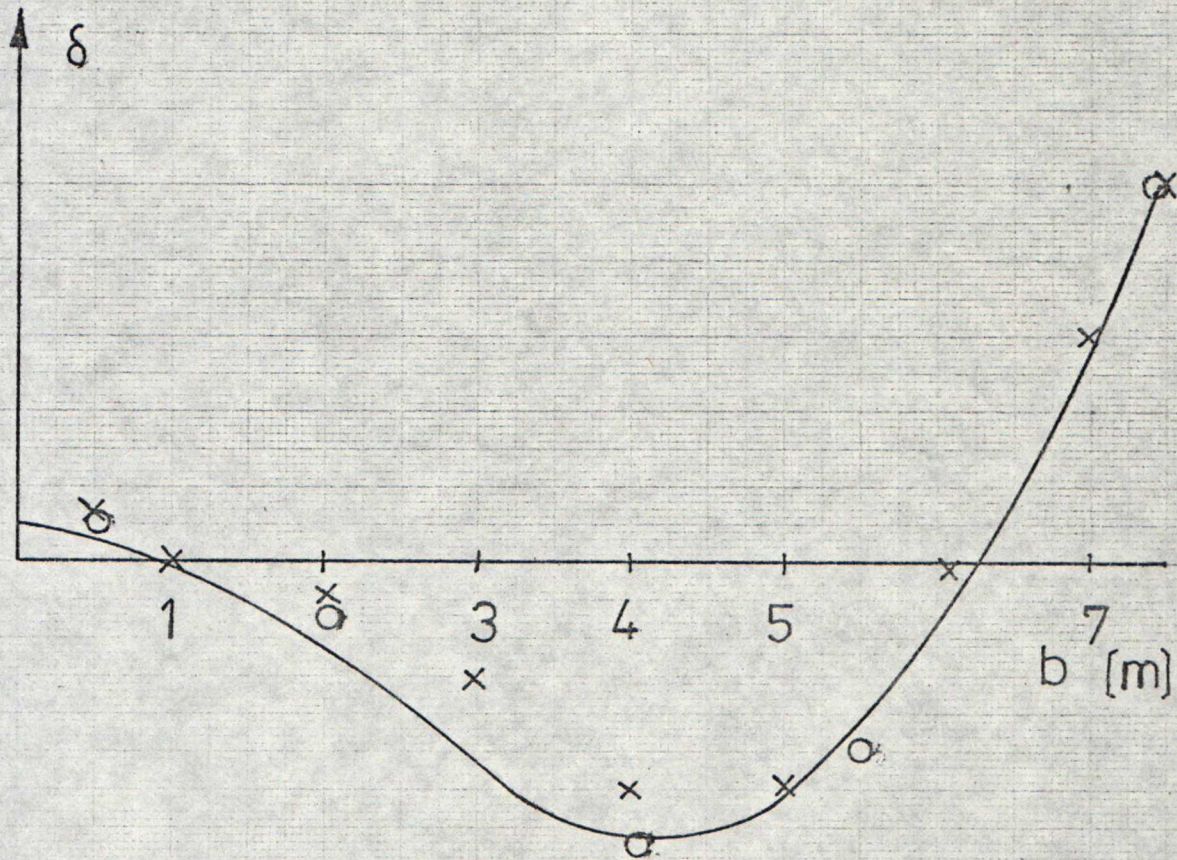
Kuva 7.19 Ohjainpintojen ominaistaajuudet

Nämä olivat vaikeita saada esiin mittaustuloksista, koska vibraattorin sijoituspaikat eivät olleet niiden herättämisen kannalta tehokkaita. Etenkin sivu- ja korkeusperäsimen ominaistaajuudet ovat epävarmoja.



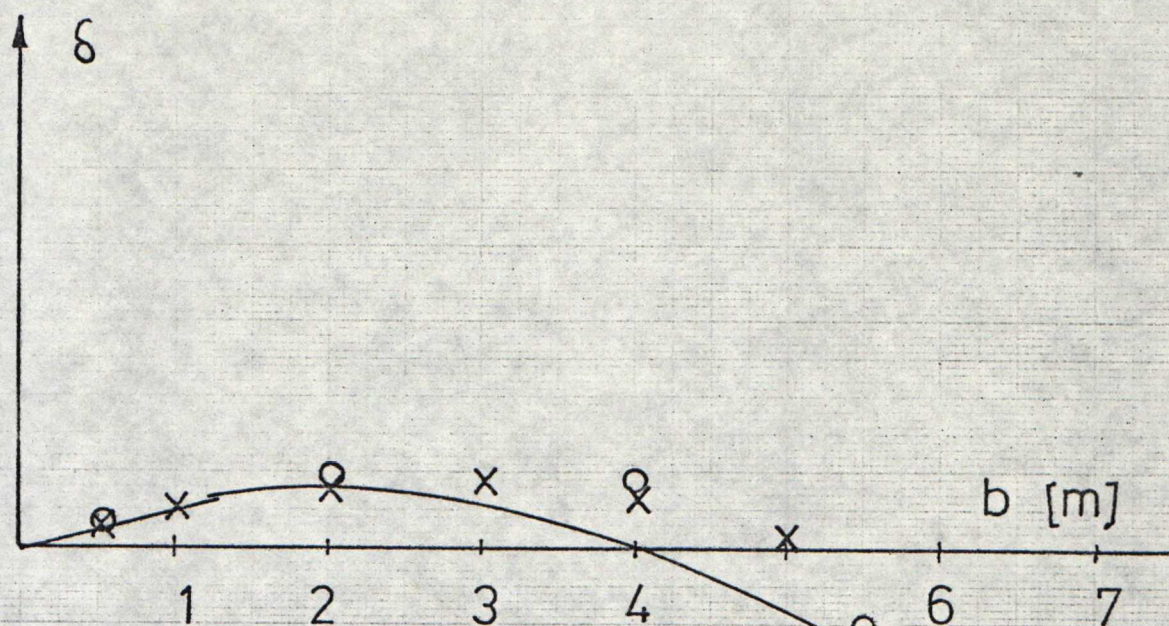
Siiven I symmetrinen taivutus

x = vasaratestatu
o = tärästintestattu
— = laskettu käyrä

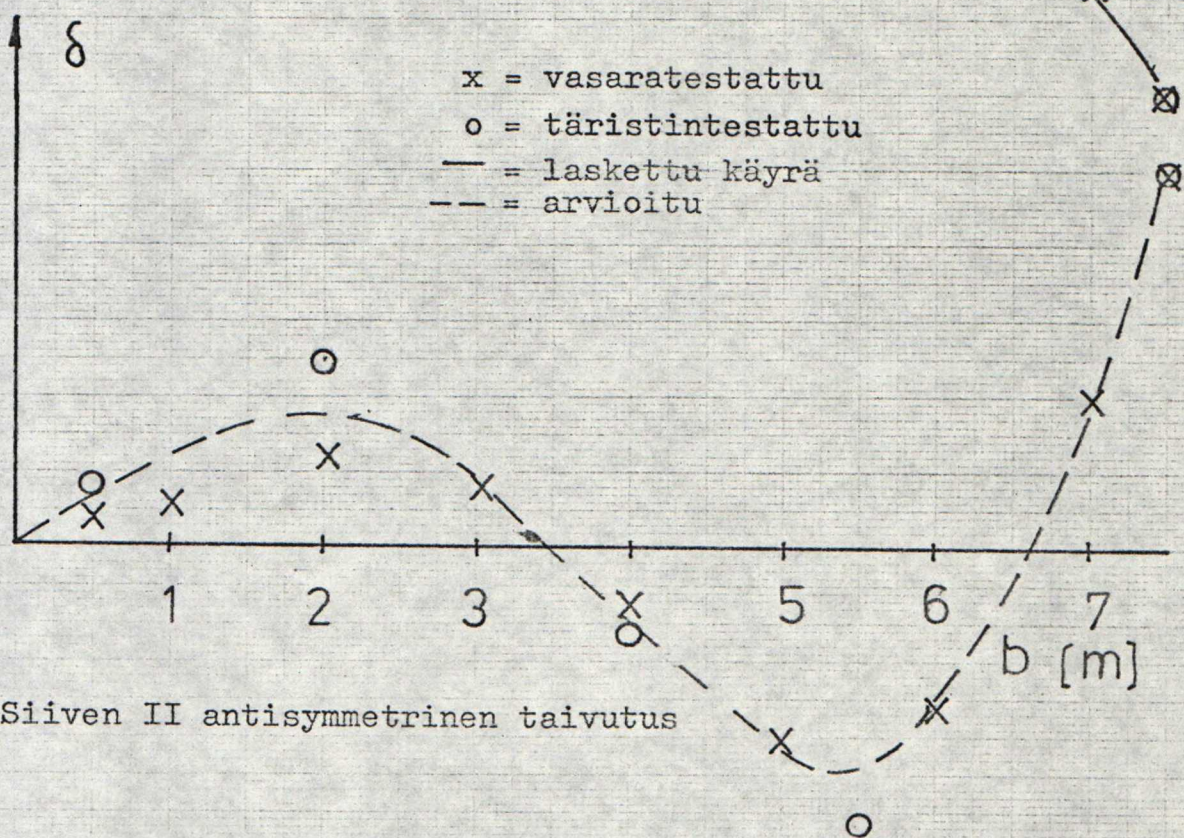


Siiven II symmetrinen taivutus

Kuva 7.20 Värähtelymuotoja

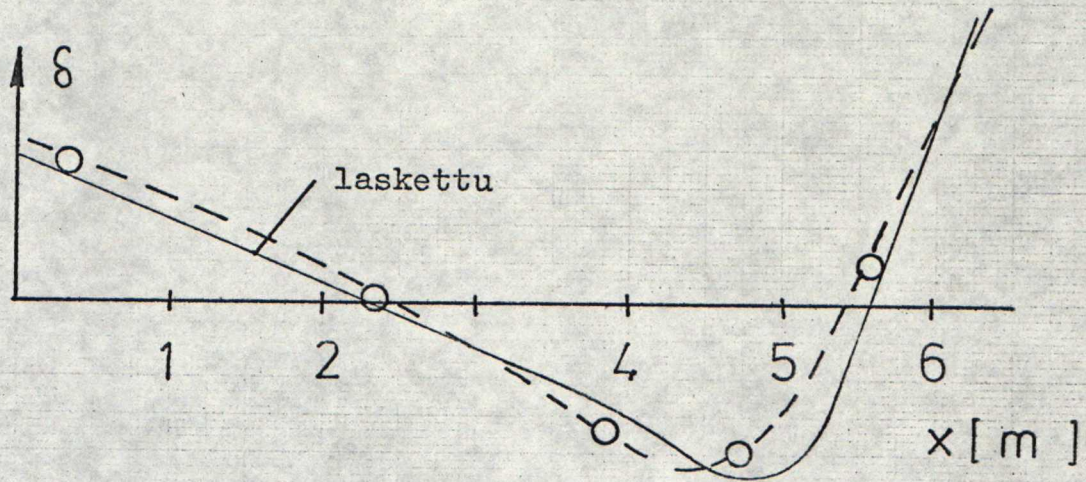


Siiven I antisymmetrinen taivutus



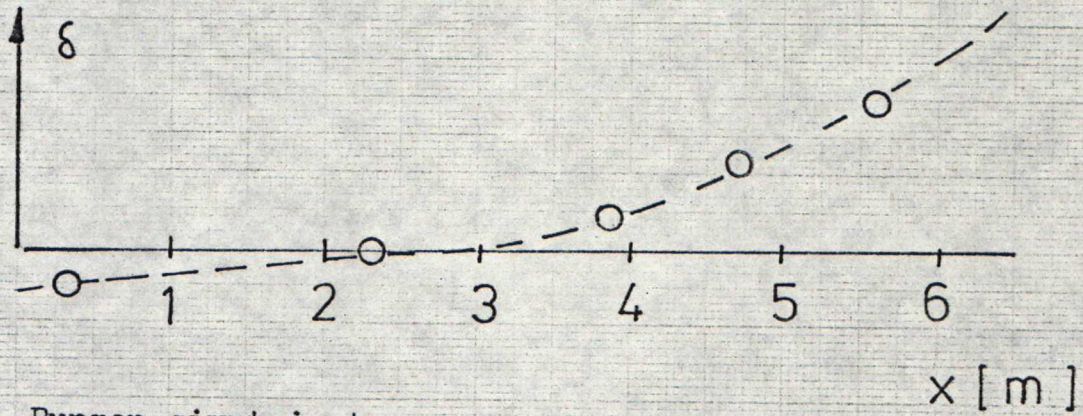
Siiven II antisymmetrinen taivutus

Kuva 7.21 Värähtelymuotoja

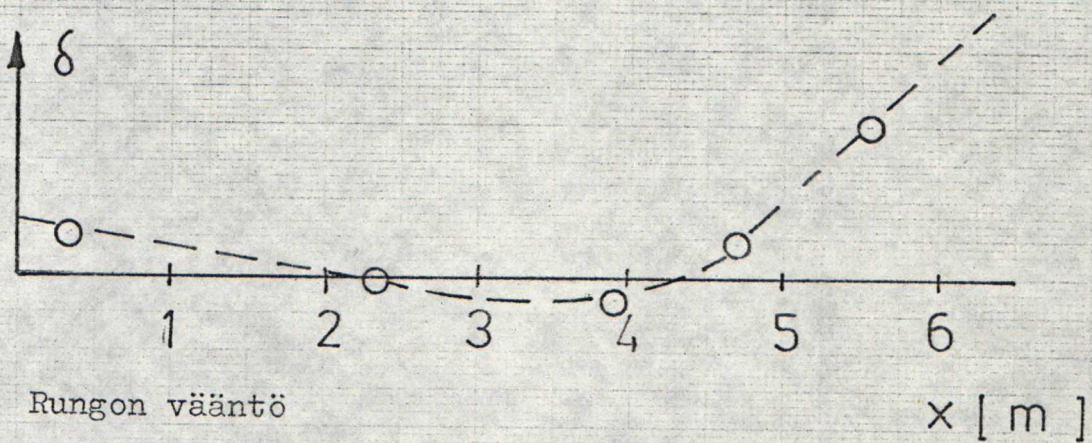


Rungon pystytaivutus

o = täristintestattu

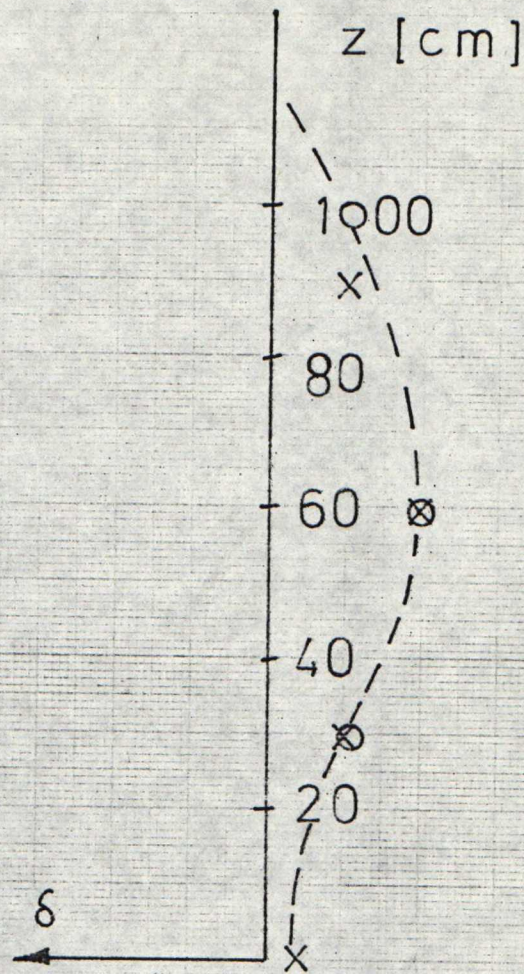


Rungon sivutaivutus



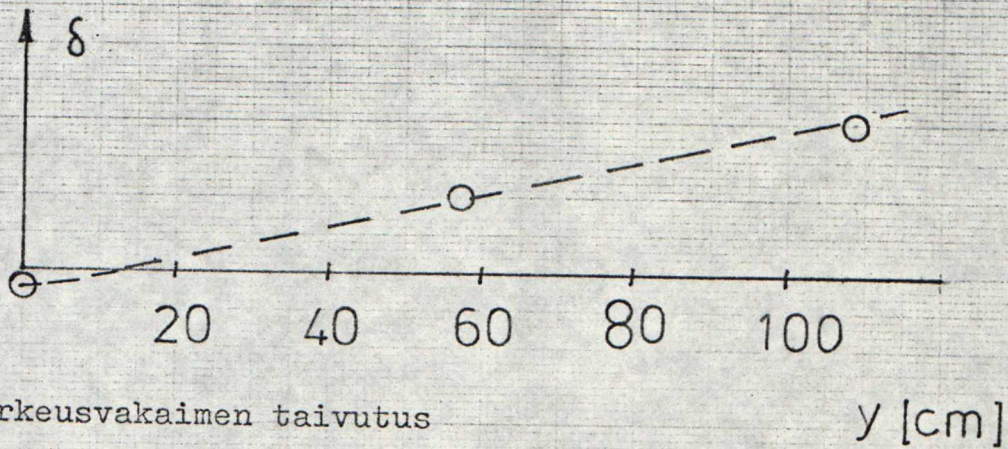
Rungon vääntö

Kuva 7.22 Värähtelymuotoja



Sivuvakaimen taivutus

x = vasaratestatettu
o = täristintestattu



Korkeusvakaimen taivutus

Kuva 7.23 Värähtelymuotoja

7.5 Tulosten tarkastelua

Täristimen ja anturin vaikutus tuloksiin

Täristimen vaikutusta ominaistajuuksiin ja -muotoihin on vaikea arvioida numerollisesti. Mittauksia suoritettaessa havaittiin, että jos täristimen työntötanko pääsi muodostumaan tukipisteeksi rakenteelle värähtely vääristyi täysin. Oikein asennetulla täristimellä ei ole virheitä aiheuttavaa vaikutusta päättellen siitä, että vasaratestatut tulokset ovat varsin lähellä täristimellä testattuja (taulukko 7 - 1).

Anturin lisämässän vaikutuksen laskemiseen voidaan käyttää lähteessä 16 sivulla 65 annettua kaavaa

$$\Delta f_1 = f_1 \left(1 - \sqrt{\frac{1}{1 + \Delta m/m}} \right) \quad (7.1)$$

jossa Δf_1 = ominaistajuuden muutos

m = rakenteen massa

Δm = lisämässän suuruus

Anturin massa kiinnitysalustoineen on 150 g. Suurin virhe aiheutuu päärakenteissa korkeusvakaimen, joka on kevein rakenne-elementti. Virhe on n. 0.6 Hz eli 4 % alimman ominaistajuuden osalla, kun rakenteen massaksi otetaan puolet korkeusvakain - peräsin yhdistelmän massasta. Lähteen 16 mukaan kaava 7.1 antaa liian suuria virheitä ja todellisuudessa virhe on kerta-luokkaa pienempi.

Ohjainpintojen ominaistajuus voidaan laskea kaavasta /16, s.65/

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C}{I}} \quad (7.2)$$

jossa I = ohjainpinnan hitausmomentti saranaviivan suhteen

C = ohjainlinjan jäykkyys

Anturi lisää ohjainpinnan hitausmomenttia määrällä mr^2 , jossa

m = anturin massa ja r sen etäisyys saranalinjasta. Liitteessä 3 esitettyjen ohjainpintojen hitausarvojen perusteella voidaan laskea, että korkeusperäsimen ominaistaajuus alenee anturin vaikutuksesta n. 5 %, sivuperäsimen n. 4 % ja laskusiivekkeiden ja siivekkeiden n. 1 % ja 5 %. Päättellen pääarakenteesta mitatuista "piikeistä" ero oli juuri tätä suuruusluokkaa.

Sekalaiset virheet

Käyttämällä analysaattorin PEAK -toimintoa saatiin kukin ominaistaajuus viiden desimaalin tarkkuudella kuvaputkelle, joten silmän epätarkkuudesta johtuvaa lukuvirhettä ei ole tuloksissa. Sen sijaan karkeahko resoluutio teki piikkien kärjet hieman epätarkan muotoiseksi, josta aiheutuva virhe on arviolta ± 0.05 Hz.

Amplitudien lukeminen imaginääripiikeistä oli myöskin tarkkaa, koska piikin viereen tuli kuvaputkelle skaalattu asteikko. Virhe amplitudissa on muutaman prosentin suuruusluokkaa. Vasaralla ja tärstimellä testatut värähtelymuodot eivät ole täysin vertailukelpoisia, koska vasaratestaus suoritettiin esim. siiven taivutusta mitattaessa salon kohdalta ja tärstimä käytettäessä kiihtyvyysanturi oli lähellä etu- ja takareunoja. Tärstimen avulla mitatuiksi amplitudeiksi on otettu kuviin 7.20 - 7.23 etu- ja takareunan amplitudien keskiarvo.

Suurin amplitudivirhe voi joidenkin moodien kohdalla aiheutua siirtofunktioittauksen perusheikkoudesta: voimakkaammat moodit kätkevät heikompien moodien amplitudit alleen. Suoritettujen mitausten perusteella on vaikea sanoa missä näin olisi käynyt.

Tärstimen alarajataajuudesta tai välyksestä johtuva alle 10 Hz moodien kahdentuminen ei suoritettujen tarkastelujen perusteella aiheuttanut merkittävää virhettä. Ominaistaajuudeksi otettiin ylä- ja alapiikin keskiarvo, amplitudin osalta oli lähes sama otettiin yläpiikin tai alapiikin arvo.

Suuresta kaistanleveydestä johtuva karkeahko resoluutio teki yleistettyjen massojen mittauksen mahdottomaksi. Vaimennukselle saataneen tästä huolimatta käyttökelpoisia likiarvoja, mutta sitä ei tässä yhteydessä tarvinnut määrittää.

Lasketut arvot

Lähteen 23 tietokoneohjelmilla lasketut ominaistaajuudet ja -muodot ovat siiven symmetrisen ja epäsymmetrisen taivutuksen osalta erittäin hyvässä sopusoinnussa mittaustulosten kanssa. Siiven väännön osalta korrelaatio on heikompi, joka johtuu siitä, että vääntöjäykkyys on arvioitua suurempi.

Rungon pystytaivutuksen alin ominaistaajuus ja sitä vastaava värähtelymuoto ovat varsin lähellä laskettuja arvoja. Sen sijaan rungon väännölle ei saatu mielekkäitä laskettuja arvoja. Moottorin aukko yms. tekijät tekevät rungon vääntöjäykkyyden arvioimisen vaikeaksi.

Vertailu PIK-20A:n kanssa

Taulukosta 7-1 nähdään, että ominaistaajuudet ovat varsin lähellä PIK-20A:n arvoja, vaikka koneiden rakenteissa on merkittäviäkin eroja. Yllättävää on, että siiven alin vääntötaajuus on sama, vaikka PIK-20E:ssä on vähennetty siiven pintakankaita. Ilmeisesti siiven massahitausmomentti on pienentynyt samassa suhteessa.

Verrattaessa rungon pystytaivutusmuotoja nähdään moottorin vaikutus varsin selvästi. Moottorin kohdalla amplitudi on huomattavasti suurempi kuin vastaava A-mallin amplitudi. Myöskin ominaistaajuus on alempi.

Ohjainpintojen ominaistaajuudet ovat lähes samat, joka selittyy sillä, että ohjainlinjojen jäykkyydet ovat lähes samat. Nyt mitatut taajuudet ovat tosin epävarmoja.

8. YHTEENVETO

Työssä on käsitelty värähtelykokeiden teoriaa ja koemenetelmiä digitaalisen signaalianalysoijan käyttöä silmälläpitäen. Sovellutuksena on suoritettu apumootorilla varustetun purjelentokoneen PIK-20E maavärähtelykokeet.

Työssä todettiin, että HP-5420A soveltuu erittäin hyvin lentokoneen maavärähtelykokeissa käytettäväksi. Mittaustekniikka on yksinkertaisempaa ja laitteisto on kertaluokkaa halvempi kuin luvussa 6 esitellyn klassisen menetelmän yhteydessä.

Sovellutuksen puutteet johtuvat ajanpuutteen sanelemista osittain epätäydellisistä mittauksista, eivätkä käytetystä laitteistosta lukuunottamatta tärhistintä, joka ei toiminut kunnolla alimilla taajuuksilla.

Suuresta kaistanleveydestä johtuva karkeahko resoluutio aiheutti sen, ettei yleistettyjä massoja sekä vaimennusta voitu luotettavasti määrittää. Suoritettujen mittausten jälkeen olisi pitänyt suorittaa lisämittauksia kustakin ominaistaajuudesta kaapealla kaistanleveydellä. Täydellisesti suoritettavat mittaukset kestävät arviolta 5 - 7 työpäivää.

Rakenteen pääkomponenttien ominaistaajuudet ja -muodot ovat riittävän tarkkoja. Sen sijaan ohjainpintojen ominaistaajuuksissa on epävarmuutta. Niitä mitattaessa tulisikin käyttää hyvin pientä (esim. resistiivistä) kiihtyvyysanturia ja tärhistin tulisi sijoittaa lähelle ohjainpintaa.

Mittausjärjestelyjen rationalisoinnin lisäksi mittaustulosten jatkokäsittely HP-IB -järjestelmän avulla on mielenkiintoinen lisätutkimusten aihe. Ensisijainen tehtävä olisi värähtelevää lentokonetta kuvaavan mallin kehittäminen ja ohjelmoiminen. Täten välttyttäisiin manuaaliselta tiedonkeruulta, joka nyt oli mittausten rasittavin ja aikaavievin vaihe.

LÄHTEET

- /1/ Ramsey, Kenneth A.: Effective Measurements for Structural Dynamics Testing, Part I. Sound and Vibration, November 1975, 11 s.
- /2/ Fourier Analyzer Training Manual. Hewlett Packard Company, Application Note 140-0, 60 s.
- /3/ Pentikäinen, Juha : Taajuusanalysoinnista TKK:n mittalaitteilla. TKK Autotekniikan Laboratorio, Tutkimusraportti 1979/1, Otaniemi 1979, 33 s.
- /4/ Lang, George F.: Understanding Vibration Measurements. Nicolet Scientific Corporation, Application Note 9, New Jersey 1975, 15 s.
- /5/ Digital Signal Analysis Time and Frequency Domain Measurements, Application Note 240-0. Hewlett Packard Company, 1977, 15 s.
- /6/ Ramsey, Kenneth A.: Effective Measurements for Structural Dynamics Testing, Part II. Sound and Vibration, December 1975, 13 s.
- /7/ Haftka, Raphael T.: Repetitive Flutter Calculations in Structural Design. Journal of Aircraft, July 1976, 8 s.
- /8/ Federal Aviation Regulations, Part 23. Washington DC 1980.
- /9/ OSTIV Airworthiness Requirements for Sailplanes, 1976.
- /10/ Lufttüchtigkeitsforderungen für Segelflugzeuge und Motorssegler, Oktober 1975.
- /11/ Niedbal N.: Flatteranalyse des Segelflugzeuges ASW-15 unter Verwendung der im Stand gemessenen Eigenschwingungskenngrößen. DFVLR-AVA Bericht Nr. IB 253-73 J 01, Göttingen 1973, 63 s.

- /12/ Stender W.: Praxisnahe Abschätzung- und Vorbeugemöglichkeit gegen Flatterfährdung von Segelflugzeugen und kleinen Motorflugzeugen Teil II. DFVLR-Bericht IB 151-74/20.
- /13/ Rosenbaum, Robert: Simplified Flutter Prevention Criteria for Personal Type Aircraft. FAA Airframe and Equipment Engineering Report No. 45, 26 s.
- /14/ Mai, Ulv H. : Tekijälle lähetetty kirje 1.3.1980.
- /15/ Beatrix, Christian: Experimental Determination of the Vibratory Characteristics of Structures. ONERA Technical Note No. 212 E, 1974, 32 s.
- /16/ Kokko, Juha: Purjelentokoneen PIK-20 Värähtelykoheet. Diplomityö, Otaniemi 1974, 129 s.
- /17/ Wissenschaftlich-Technische Aktivitäten im Institut für Aeroelastik der DFVLR. Göttingen 1977, 39 s.
- /18/ Means of Compliance with FAR 23.629, Flutter. FAA Advisory Circular 23.629-1, Washington DC 1979, 45 s.
- /19/ Richardson M. and Kniskern J. : Identifying Modes of Large Structures from Multiple Input and Response Measurements. Society of Automotive Engineers, Warrendale 1976, 7 s.
- /20/ Niedbal N. : Suusanallinen tiedonanto tekijälle Göttingenissä 19.1.1980.
- /21/ Niedbal N.: Kirje Eiri-Avion Oy:lle 16.2.1980.
- /22/ Tärinän mittaus. Oy Suomen Bruel & Kjaer Ab, 40 s.
- /23/ Korhonen Hannu : Lentokoneen Aeroelastiset Värähtelyt ja Niiden Estäminen. Diplomityö, Otaniemi 1972, 173 s.

/24/ PIK-20E:n lujuuslaskuja. Eiri-Avion Oy, julkaisematon.

KIRJALLISUUTTA:

- /1/ Väisälä, K.: Matematiikka IV. Teknillisen Korkeakoulun Ylioppilaskunta, Moniste No. 141, Otaniemi 1974, 78 s.
- /2/ Sveshnikov, A., Tikhonov, A.: The Theory of Functions of a Complex Variable. MIR Publishers, Moscow 1973, 311 s.
- /3/ Broch, J.T.: Mechanical Vibration and Shock Measurements. Bruel & Kjaer 1976, 310 s.
- /4/ Randall, R.B.: Frequency Analysis. Bruel & Kjaer 1977, 239 s.

LIITE 1

1. RESIDY

Residy liittyy tässä yhteydessä oleellisesti kompleksisen värähtelymoodin käsitteeseen. Mikäli vaimennusmatriisi on symmetrinen ja reaaliarvoinen, modaalivektorit voivat yleisesti ottaen olla kompleksisia. Jos modaalivektorit ovat reaaliarvoisia ne vastaavat värähtelymuotoa. Kompleksisten modaalivektoreiden yhteydessä tulkinta on hieman toinen /1, s.6/:

Yksittäisen moodin siirtomatriisi voidaan kirjoittaa:

$$H_k(s) = \frac{a_k}{s - p_k} + \frac{a_k^*}{s - p_k^*}$$

jossa $a_k = (n \times n)$ kompleksinen residymatriisi
 $p_k =$ moodin k navan sijainti

Yksittäinen $H(s)$:n komponentti voidaan täten kirjoittaa:

$$H(s) = \frac{r_k}{2j(s - p_k)} - \frac{r_k^*}{2j(s - p_k^*)}$$

jossa $\frac{r_k}{2j} =$ moodin k kompleksinen residy

Ylläolevan siirtofunktion yhtälön käänteinen Laplace-muunnos on nyt moodin k impulssivaste. Toisin sanoen, jos ainoastaan moodi k herätettäisiin, sen aikavaste olisi:

$$x_k(t) = r_k e^{-\lambda_k t} \sin(\omega_k t - \alpha_k)$$

jossa $r_k =$ residyn suuruus
 $\alpha_k =$ residyn vaihekulma

Kompleksisen residyn vaihekulma osoittaa impulssivasteen vaihe-siirtymän. Jos vaihekulma on nolla, moodista käytetään nimitystä normaalimoodi ja se on reaaliarvoinen. Kompleksinen värähtelymuoto kuvaa siis impulssivasteen vaiheviivettä.

Kokeellisissa mittauksissa puhutaan normaalimoodista silloin, kun rakenteen kaikki kohdat saavuttavat suurimman tai pienimmän

siirtymänsä samalla hetkellä. Toisin sanoen jokainen kohta on joko samassa vaiheessa keskenään tai välillä on 180 asteen vaihesiirto. Kompleksisen moodin yhteydessä muutkin vaihekulmat kuin 0 ja 180 astetta ovat mahdollisia. Täten esimerkiksi normaalimoodien solmukohdat ovat stationäärisiä, mutta kompleksisten moodien solmukohdat liikkuvat.

2. KONVOLUUTIO

Aika- ja taajuustason välisiä yhteyksiä tarkasteltaessa on ns. konvoluutioteoreema osoittautunut hyödylliseksi/2, s.4-5/:

On olemassa funktiot $S_x(f) = x(t) \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i2\pi ft} dt$

ja $S_y(f) = y(t) \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-i2\pi ft} dt$

Merkitään $x(t) * y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) y(\psi - t) dt$

jossa * tarkoittaa konvoluutiota. Konvoluutioteoreeman mukaan:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} (S_x(f) * S_y(f)) e^{+i2\pi ft} dt = x(t) \cdot y(t)$$

Konvoluutio toisessa tasossa merkitsee siis kertolaskua toisessa tasossa. Tätä tietoa käytetään hyväksi analyysoijan digitaalisissa suodattimissa /2, luku 4/.

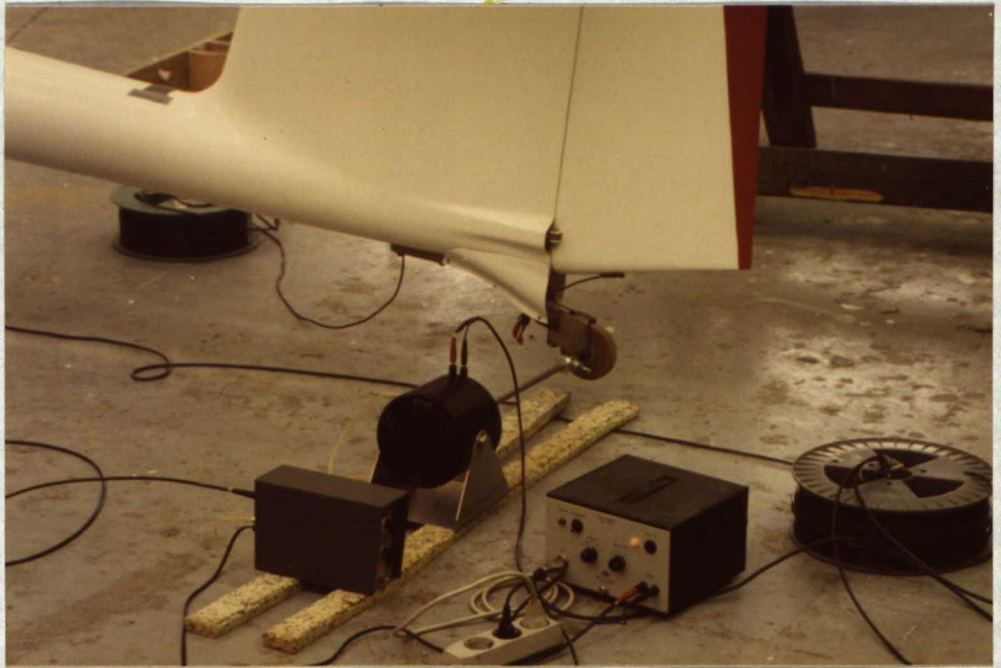
LIITE 2



Yleiskuva koneen ripustuksesta



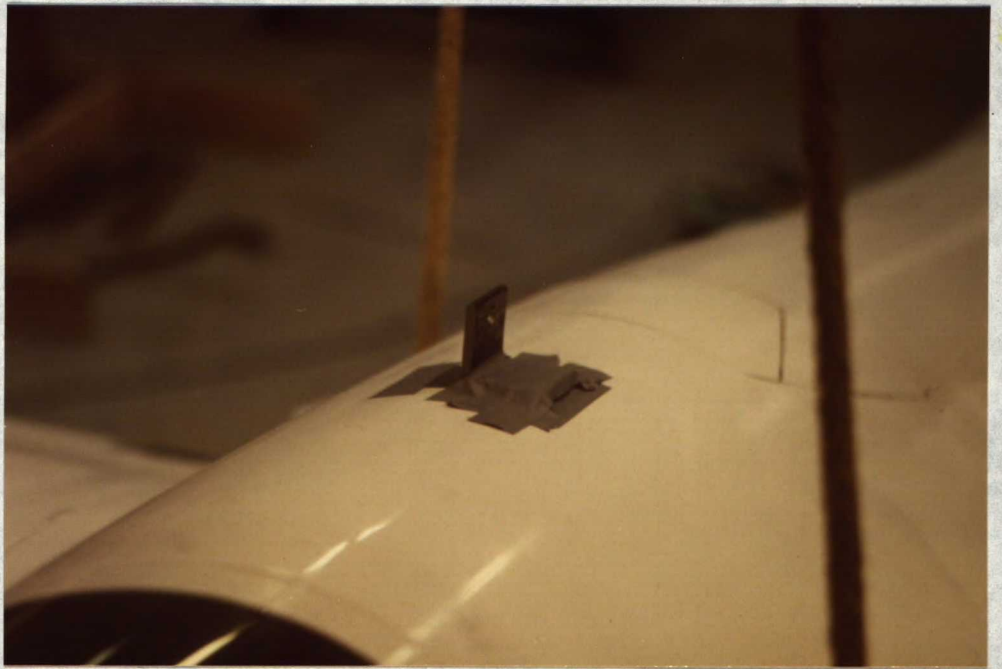
Siiven taivutusvärähtelyn mittausjärjestelyt. Kuvassa näkyy täristin työntötankoineen sekä kiihtyvyyssanturi.



Rungon sivutaivutuksen mittausjärjestelyt. Täristimen takana on voima-anturin vahvistin ja oikealla on täristimen tehovahvistin.



Kiihtyvyyssanturin kiinnitysalustoja korkeusvakaimessa.

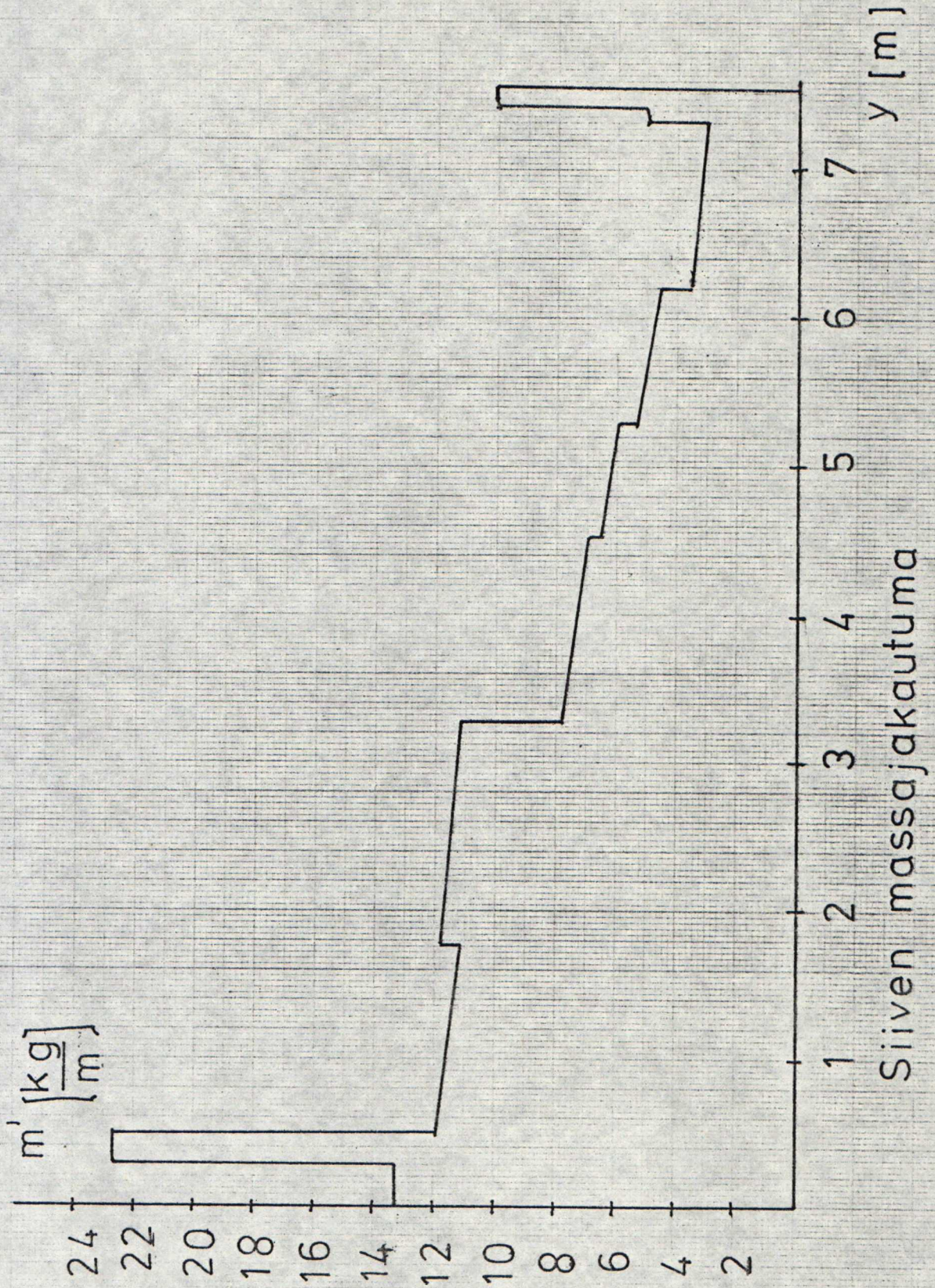


Kiihtyvyysanturin kiinnitysalusta rungon vääntöä mitattaessa.

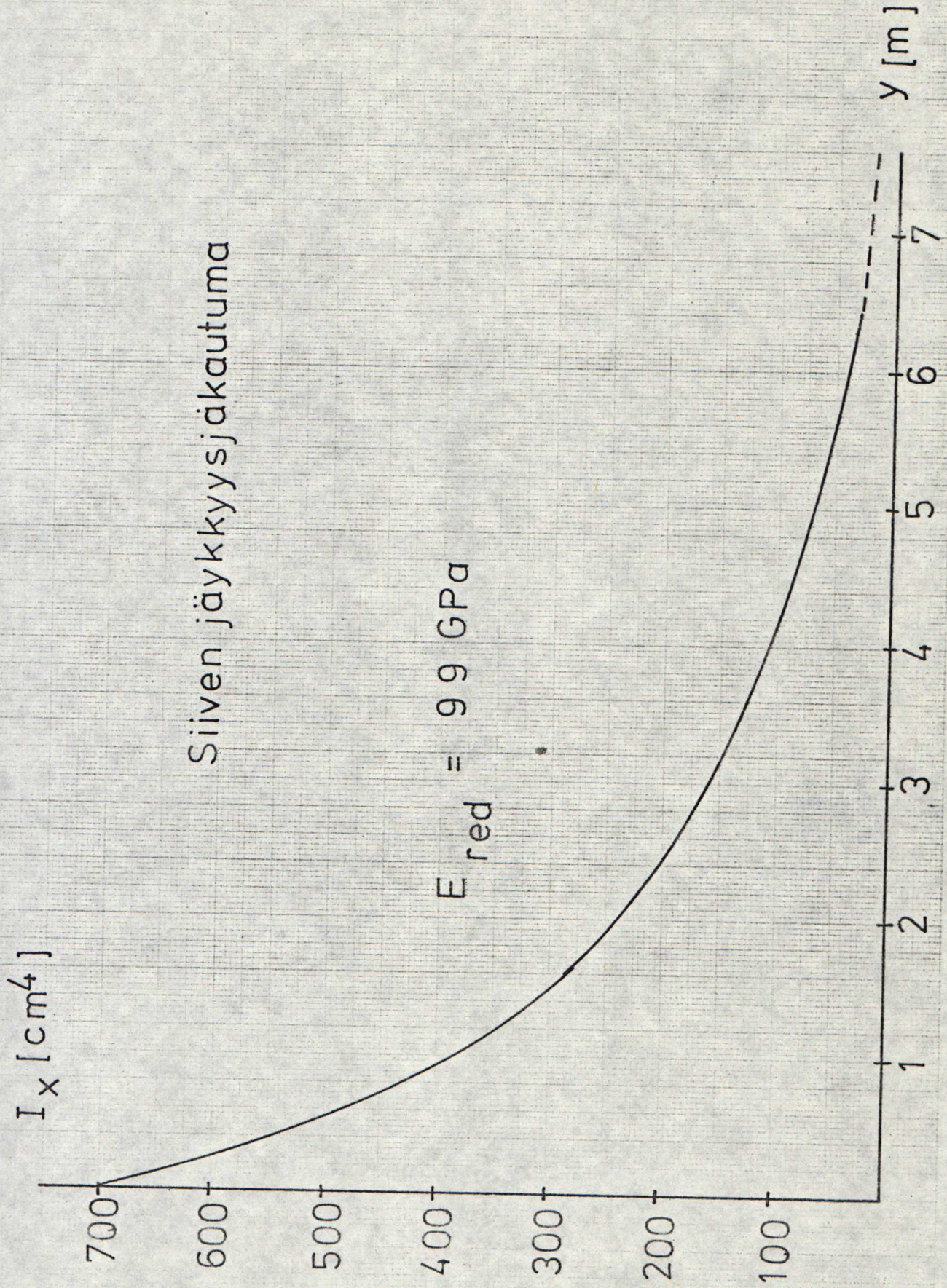


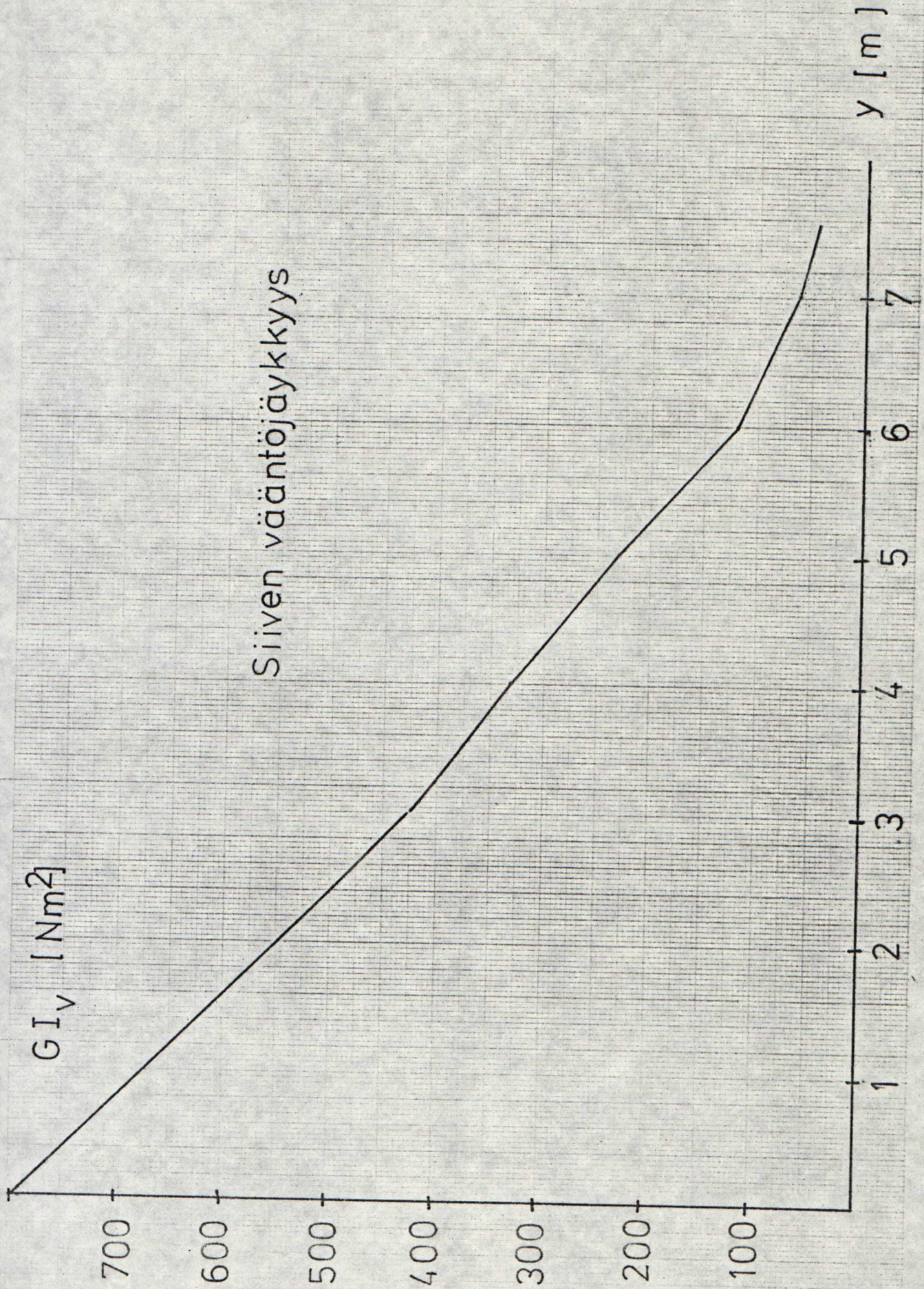
Mittauslaitteita: vasemmalla on tärinämittari, sen vieressä on analyysointilaitteisto ja yllä on oskilloskooppi.

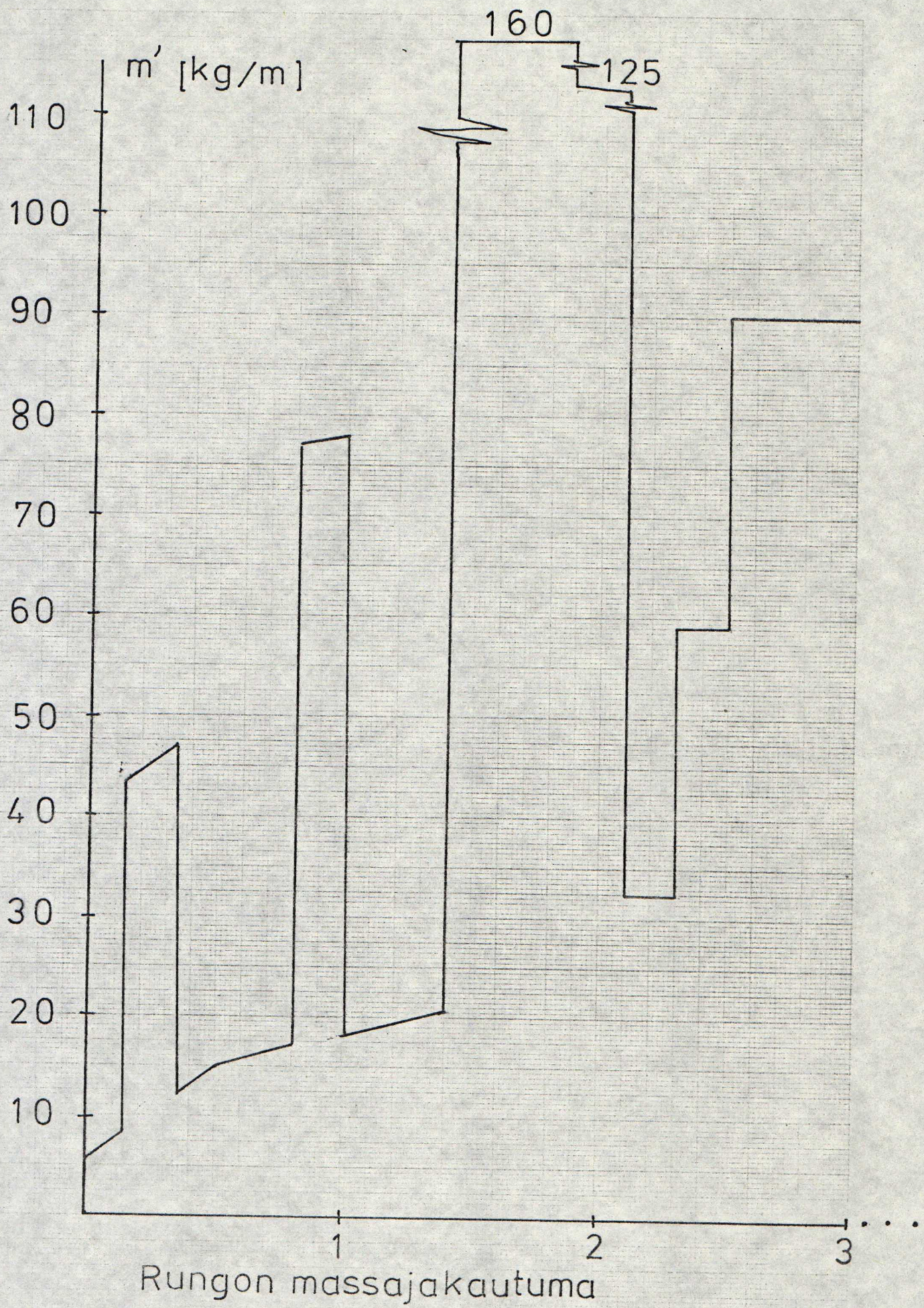
LIITE 3

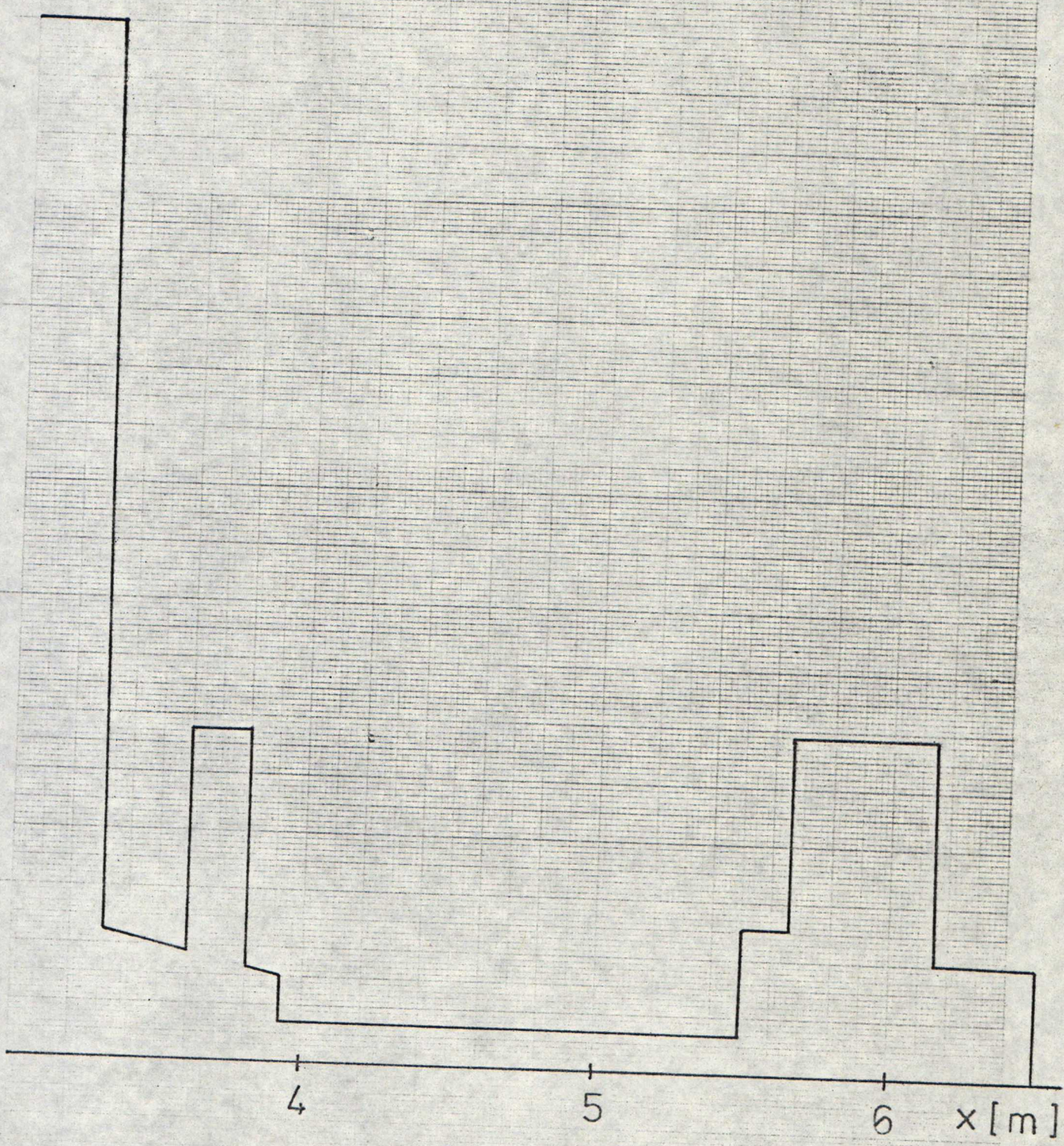


Siiven massajakautuma









Siiven symmetrinen taivutus

GET-SIIP12

RUN

SIIP12

SIIVEN PUOLISKON MASSAPISTEIDEN LUKUMAARA (MAX 20)?6

MASSAPISTE 1

MASSA /KP?22.9

ETAISYYS SIIVEN TYVESTA /CM?88

VALIN EI /KPCMÜ2?7.1626E+08

MASSAPISTE 2

MASSA /KP?3.0316.7

ETAISYYS SIIVEN TYVESTA /CM?250

VALIN EI /KPCMÜ2?3.03E+08

MASSAPISTE 3

MASSA /KP?9.4

ETAISYYS SIIVEN TYVESTA /CM?388

VALIN EI /KPCMÜ2?1.67E+08

MASSAPISTE 4

MASSA /KP?5

ETAISYYS SIIVEN TYVESTA /CM?490

VALIN EI /KPCMÜ2?.92E+08

MASSAPISTE 5

MASSA /KP?4.4

ETAISYYS SIIVEN TYVESTA /CM?575

VALIN EI /KPCMÜ2?.48E+08

MASSAPISTE 6

MASSA /KP?5.1

ETAISYYS SIIVEN TYVESTA /CM?685

VALIN EI /KPCMÜ2?.21E+08

RUNGON MASSA /KG?291

SIIVEN KIINNITYSTEN VALI /CM?1.60

RUNGON HITAUUSMOMENTTI X-AKS. SUHT. /KGCMÜ2?.35E+06

HALUATKO SYMMETRISEEN TAPAUKSEN (VASTAA 1 TAI 0)?1

1 :S KERTALUKU
=====

TAAJUUS $\lambda = 16.3183$

OMINAISVEKTORI :

-7.87794E-02

-6.83525E-02

.036579

.232331

.443326

.662789

1

2 :S KERTALUKU
=====

TAAJUUS $\lambda = 61.7033$

OMINAISVEKTORI :

8.37231E-02

2.76224E-02

-.384637

-.740977

-.683623

-.246027

1

3 :S KERTALUKU
=====

TAAJUUS $\lambda = 147.14$

OMINAISVEKTORI :

-6.55336E-02

6.90121E-02

.652048

.208819

-.68841

-1

.577395

4 :S KERTALUKU
=====

TAAJUUS $\lambda = 285.801$

OMINAISVEKTORI :

4.44206E-02

-.157686

-.468119

.724697

.241193

-1

.26417

Siiven epäsymmetrinen taivutus

GET-SIIP12
RUN
SIIP12

SIIVEN PUOLISKON MASSAPISTEIDEN LUKUMAARA (MAX 20)?6

MASSAPISTE 1
MASSA /KP?22.9
ETAISYYS SIIVEN TYVESTA /CM?88
VALIN EI /KPCMÜ2?7.26E+08

MASSAPISTE 2
MASSA /KP?16.7
ETAISYYS SIIVEN TYVESTA /CM?250
VALIN EI /KPCMÜ2?3.03E+08

MASSAPISTE 3
MASSA /KP?9.4
ETAISYYS SIIVEN TYVESTA /CM?388
VALIN EI /KPCMÜ2?1.67E+08

MASSAPISTE 4
MASSA /KP?5
ETAISYYS SIIVEN TYVESTA /CM?490
VALIN EI /KPCMÜ2?.92E+08

MASSAPISTE 5
MASSA /KP?4.4
ETAISYYS SIIVEN TYVESTA /CM?575
VALIN EI /KPCMÜ2?.48E+08

MASSAPISTE 6
MASSA /KP?5.1
ETAISYYS SIIVEN TYVESTA /CM?685
VALIN EI /KPCMÜ2?.21E+08

RUNGON MASSA /KG?291

SIIVEN KIIINNITYSTEN VALI /CM?60

RUNGON HITAUSMOMENTTI X-AKS. SUHT. /KGCMÜ2?.35E+06

HALUATKO SYMMETRISEN TAPAUKSEN (VASTAA 1 TAI 0)?0

1 :S KERTALUKU
=====

TAAJUUS W= 35.2532

OMINAISVEKTORI :

-1

-.973612

-.772649

-.435915

-9.25743E-02

.250303

.742183

2 :S KERTALUKU
=====

TAAJUUS W= 96.891

OMINAISVEKTORI :

1

.883652

.27756

-.289622

-.466133

-.318558

.306363

3 :S KERTALUKU
=====

TAAJUUS W= 190.221

OMINAISVEKTORI :

-1

-.686144

.297247

.294653

-.156554

-.37928

.132655

4 :S KERTALUKU
=====

TAAJUUS W= 312.823

OMINAISVEKTORI :

1

.361235

-.649411

.47368

.217774

-.475673

9.73248E-02

Siiven symmetrinen vääntö

GET-SVAAN
RUN
SVAAN

SIIP(1) VAI RUNKO(2)?1
SIIVEN PUOLISKON MASSAPISTEIDEN LUKUMAARA?6

ALKIO 1
HITAUSMOMENTTI/KGCM2?5922
ETAISYYS SIIVEN TYVESTA/CM?88
VALIN GIV/KPCM2?.8E03

ALKIO 2
HITAUSMOMENTTI/KGCM2?3744
ETAISYYS SIIVEN TYVESTA/CM?250
VALIN GIV/KPCM2?.6E03

ALKIO 3
HITAUSMOMENTTI/KGCM2?2970
ETAISYYS SIIVEN TYVESTA/CM?388
VALIN GIV/KPCM2?.41E03

ALKIO 4
HITAUSMOMENTTI/KGCM2?1476
ETAISYYS SIIVEN TYVESTA/CM?490
VALIN GIV/KPCM2?.28E03

ALKIO 5
HITAUSMOMENTTI/KGCM2?1060
ETAISYYS SIIVEN TYVESTA/CM?575
VALIN GIV/KPCM2?.19E03

ALKIO 6
HITAUSMOMENTTI/KGCM2?911
ETAISYYS SIIVEN TYVESTA/CM?685
VALIN GIV/KPCM2?.1E03

MUUN KONEEN HITAUUSMOMENTTI Y-AKS SUHTEEN?555.3E04

SYMMETRINEN TAPAUUS (1) VAI EI (0)?1

1 :S KERTALUKU

=====

TAAJUUS W= 145.396

OMINAISVEKTORI :

-3.12614E-03

.167101

.527356

.833245

.970038

1

.822405

2 :S KERTALUKU

=====

TAAJUUS W= 266.516

OMINAISVEKTORI :

1.04533E-03

-.534867

-.230499

-6.13899E-02

7.35442E-02

.274415

1

Rungon pystytaivutus

RUN
RUNITAI

PAINOPISTEISSA OLEVA MASSA /KG2410
SEN HITAUSMOMENTTI Y-AKS. SUUNTEEN /KGCM02264270
MONTAKO PISTETTA ENNEN PP:TA?3
MONTAKO PP:N JALKEEN?4

MASSAPISTE 1
MASSA /KG214
ETAISYYS PP:STA /CM2210.4
VALIN EI /KPCM0223.5E08

MASSAPISTE 2
MASSA /KG224.1
ETAISYYS PP:STA /CM2150.4
VALIN EI /KPCM0228.6E08

MASSAPISTE 3
MASSA /KG2108.7
ETAISYYS PP:STA /CM275.8
VALIN EI /KPCM02211.6E08

MASSAPISTE 4
MASSA /KG272.4
ETAISYYS PP:STA /CM261.3
VALIN EI /KPCM0227.0E08

MASSAPISTE 5
MASSA /KG25
ETAISYYS PP:STA /CM2132.6
VALIN EI /KPCM0223.0E08

MASSAPISTE 6
MASSA /KG27
ETAISYYS PP:STA /CM2241.7
VALIN EI /KPCM0221.5E08

MASSAPISTE 7
MASSA /KG222
ETAISYYS PP:STA /CM2357.2
VALIN EI /KPCM0221E08

1 *S KERTALUKU :
=====

TAAJUUS N= 42.3567
OMINAISVEKTORI :

-2.38859E-03

-7.52684E-02

.026111

.414193

.10059

-2.257316

-.463959

-.911933

1

2 *S KERTALUKU :
=====

TAAJUUS N= 113.511

OMINAISVEKTORI :

-2.45749E-04

-.031315

.250966

.130587

2.68649E-02

-5.20676E-02

-7.00454E-02

1

8.42722E-03

3 *S KERTALUKU :
=====

TAAJUUS N= 226.75

OMINAISVEKTORI :

5.49797E-03

-7.90214E-02

.983152

.269938

-.206306

.404653

1

-.372814

-8.17393E-02

4 *S KERTALUKU :
=====

TAAJUUS N= 375.838

OMINAISVEKTORI :

-2.04875E-04

-.011303

2.30669E-03

-1.70899E-03

-4.71375E-03

.139577

-1

5.55032E-03

5.12317E-04

OHJAINPINTOJEN MASSAT JA HITAUDET

	Massa (kg)	Massakeskiö (cm)	Hitausmomentti (kgcm ²)
Korkeus- peräsin	2.00	2.28	42.0
Sivupe- räsin	4.46	1.40	435.2
Siiveke	1.95	2.40	38.0
Laskusii- veke	4.10	3.40	176.7

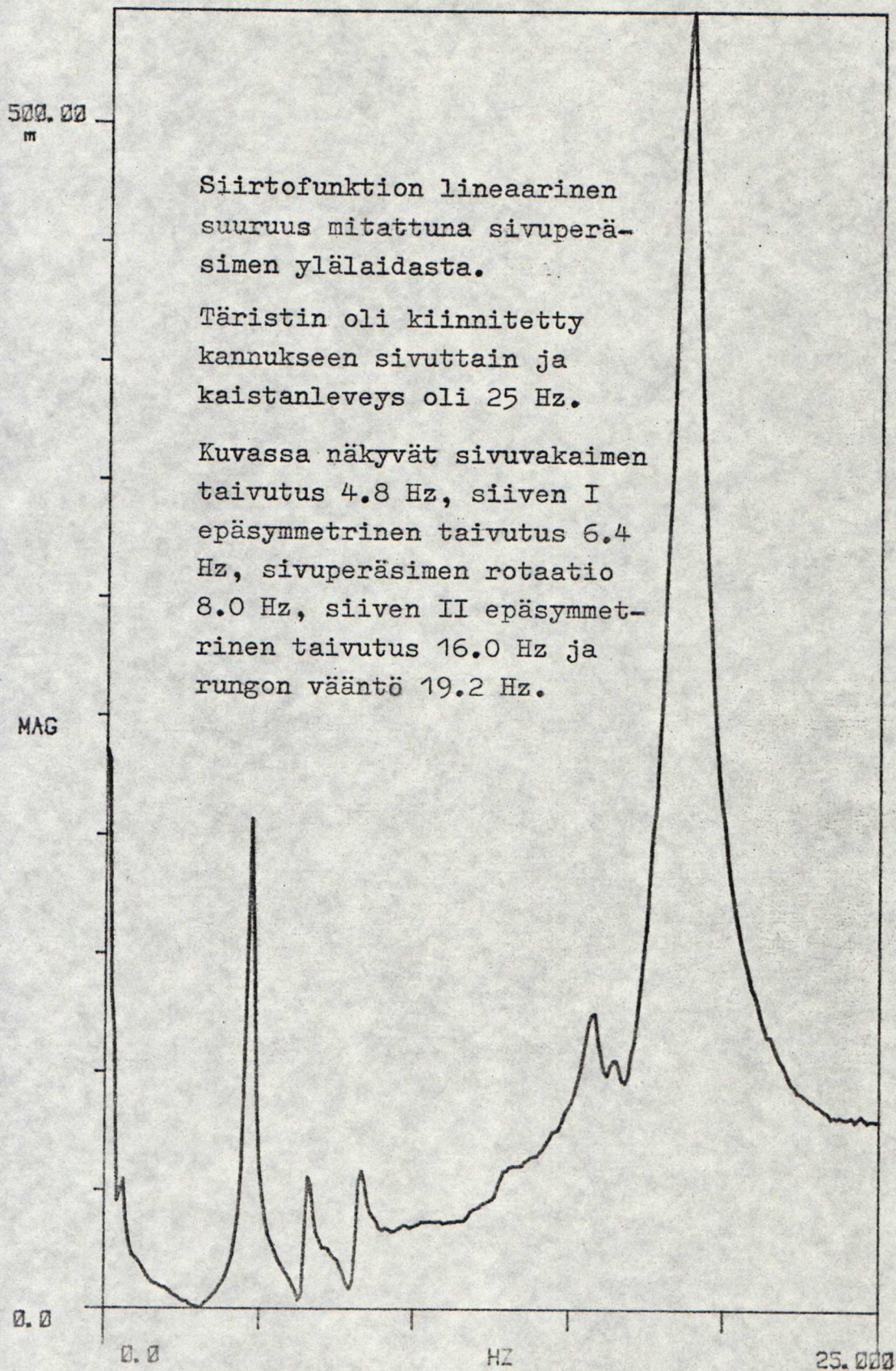
Referenssiviivana on saranaviiva. Massat ja massakeskiöasemat on mitattu koneesta S/N 20215.

LIITE 4

TRANS

R#: 84

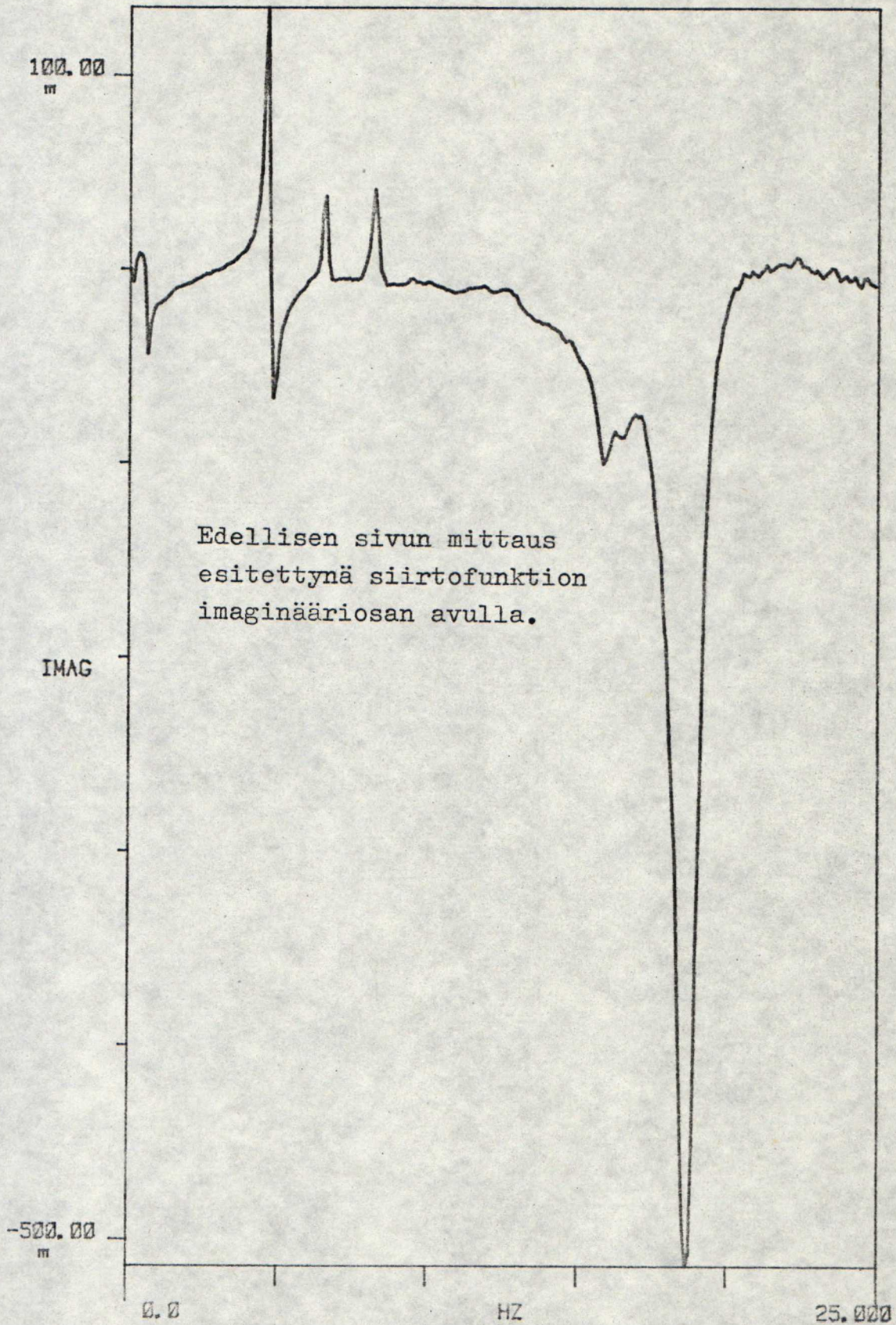
#A: 20



TRANS

R#: 84

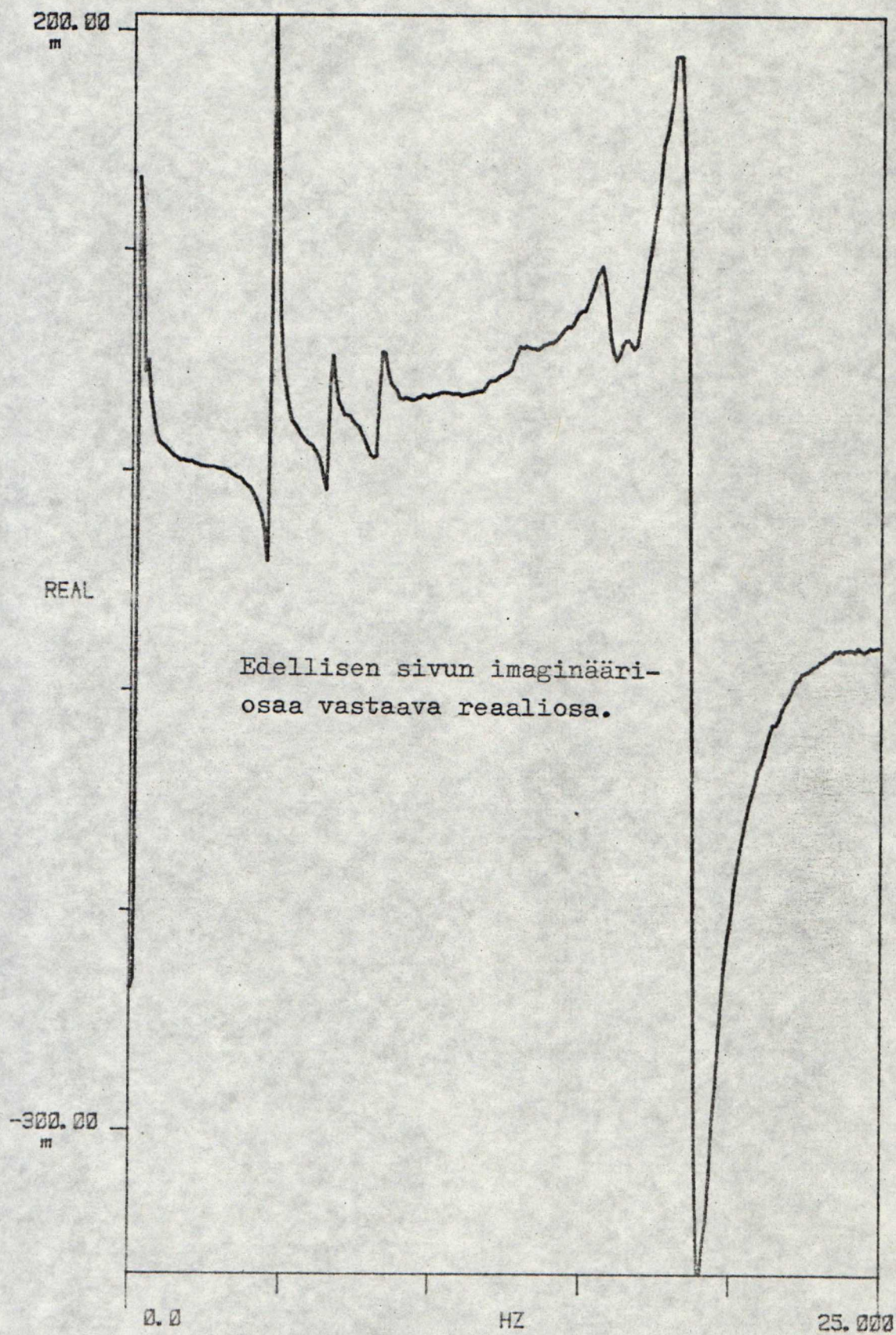
#A: 20



TRANS

R#: 84

#A: 20



TRANS
180.00

R# 84

#A: 20

PHASE

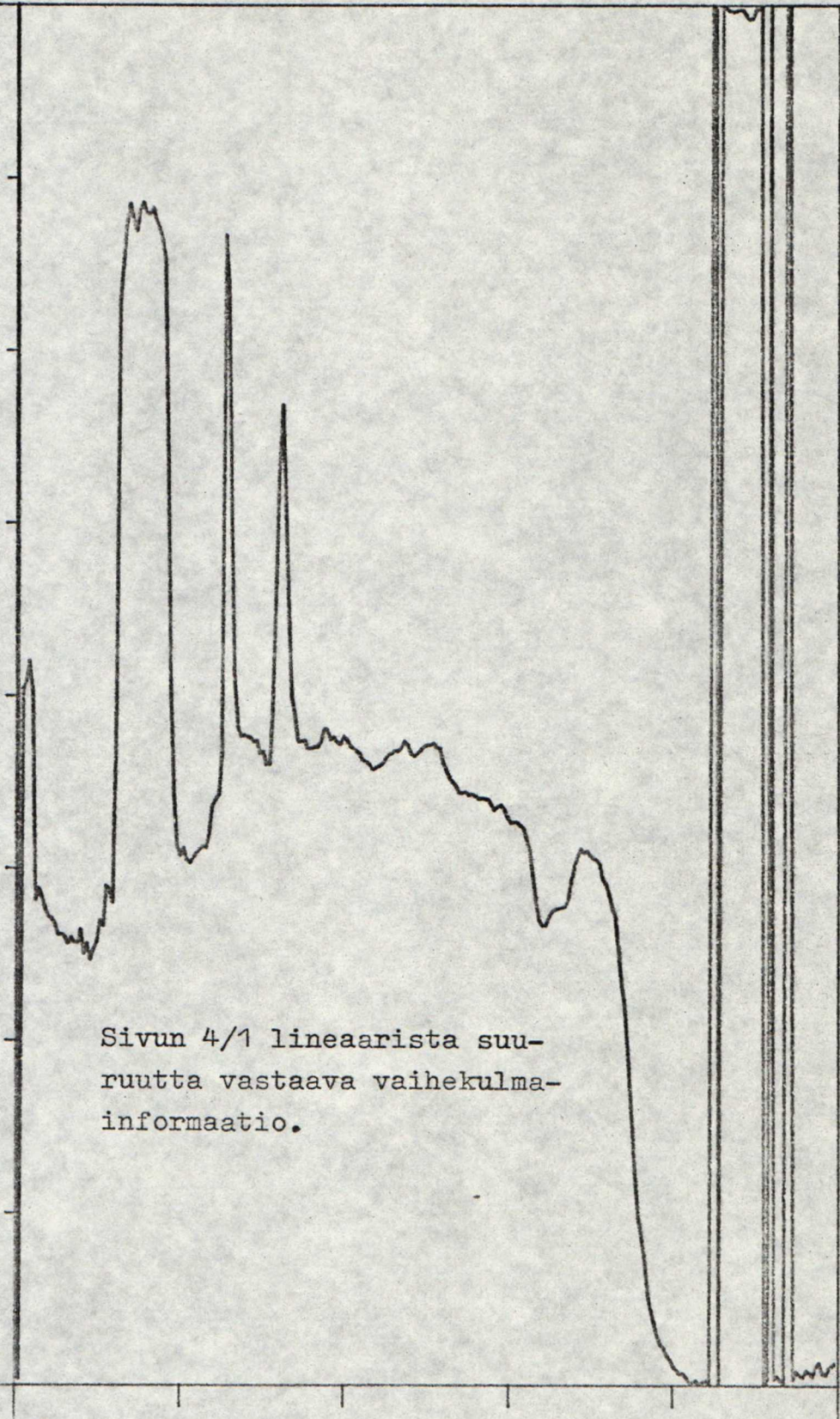
-180.00

0.0

HZ

25.000

Sivun 4/1 lineaarista suu-
ruutta vastaava vaihekulma-
informaatio.



Nyqvistin diagrammi edellisillä sivuilla esiintyneestä suurimmasta piikistä, rungon vääntömoodista.

